

Міністерство освіти і науки України

Криворізький національний університет

Електротехнічний факультет

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи бакалавра

**за спеціальністю 141 - Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка**

ТЕМА РОБОТИ:

**МОДЕРНІЗАЦІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ РОБОЧОГО ОРГАНУ ВИДОБУВНОГО
КОМБАЙНУ ТИПУ АМ-75 ЗА СИСТЕМОЮ «ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЧАСТОТИ –
АСИНХРОННИЙ ДВИГУН»**

Виконав: студент групи ЕЕМ-21-2

Б.В. Губар

Керівник випускної роботи _____

к.т.н., доц. А.Б. Сьомочкин

Нормо контролер _____

к.т.н., доц. А.Б. Сьомочкин

Декан ЕТФ _____

к.т.н., доц. В.О. Федотов

Гарант освітньої програми _____

к.т.н., доц. І.І. Пересунько

Кривий Ріг 2025 р.

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: бакалавр

Спеціальність: 141 - Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Губара Богдана Вікторовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: Модернізація електроприводу робочого органу видобувного
комбайну типу АМ-75 за системою «перетворювач частоти – асинхронний
двигун»

1. Термін подання студентом роботи: 20 червня 2025 р.
2. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: Метою є модернізація
електроприводу головного приводу (коронки) комбайну АМ-75. Завданнями
досліджень є розробка та проектування автоматизованого
електромеханічного комплексу на новій елементній базі
3. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити) I.
Характеристика електромеханічної системи, вибір електрообладнання та
розрахунок статичних характеристик привода; II. Обґрунтування і розробка
системи керування електроприводом; III. Моделювання динамічних режимів
роботи привода механізму на ЕОМ.
4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових
креслень) I. Загальний вид комбайну та технічна характеристика; II.
Розрахунок статичних характеристик системи привода; III. Розробка
системи керування ПЧ-АД головного приводу комбайну; IV. Обґрунтування
системи керування та побудування моделі для дослідження динаміки; V.
Дослідження динаміки системи електроприводу -1; VI. Дослідження динаміки
системи електроприводу -2

5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Сьомочкин А.Б.		
II	Сьомочкин А.Б.		
III	Сьомочкин А.Б.		

7. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін
1	Основні відомості про технологічний механізм, загальний вид, кінематика і режими роботи вид, кінематика і режими роботи	
2	Обґрунтування і вибір системи електропривода	
3	Розрахунок потужності і вибір електродвигуна	
4	Розрахунок перетворювача, вибір елементів силової	
5	Розрахунок параметрів схеми заміщення, розрахунок механічних і енергетичних характеристик	
6	Обґрунтування і вибір структури системи керування електроприводом	
7	Розрахунок параметрів елементів системи керування електроприводом	
8	Розробка алгоритмів та програмного забезпечення мікропроцесорної системи керування електроприводом	
9	Моделювання статичних та динамічних режимів замкненої системи в пуско-гальмівних режимах та при навантаженні	
10	Аналіз якісних показників розробленої системи керування	

Дата видання завдання 12.05.2025 р.

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

_____ Губар Б.В.
(ПБ)

Керівник роботи _____
(підпис)

_____ Сьомочкин А.Б. _
(ПБ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи бакалавра на тему:
«Модернізація електроприводу робочого органу видобувного комбайну
типу АМ-75 за системою «перетворювач частоти – асинхронний двигун»»

КНУ.РБ.141.25.249-04

71 с., 41 рис., 4 табл., 8 літературних джерел

Об'єкт дослідження – електропривод коронки видобувного
комбайну АМ-75 за системою ПЧ-АД

В першому розділі наведено загальний вид видобувного комбайну АМ-75, кінематична схема механізму, визначені вимоги до ЕП коронки. Дана коротка характеристика технологічного процесу видобування за допомогою коронки.. На основі аналізу низки вимог до ЕП обрано систему ПЧ-АД, яка задовільняє вимогам. Здійснені розрахунок потужності та вибір приводного двигуна коронки. Складена схема заміщення асинхронного приводу та визначені її параметри. Розраховані та побудовані статичні та енергетичні характеристики системи ПЧ-АД

У другому розділі здійснені обґрунтування та розробка системи керування системою приводу ПЧ-АД. За базову прийнята скалярна система регулювання швидкості. Надана також розробка мікропроцесорного варіанту керування перетворювача частоти.

У третьому розділі виконано побудування моделі системи ПЧ-АД з дослідженням динамічних режимів роботи привода коронки. Визначено, що впровадження системи скалярного керування значно поліпшує показники статички електропривода, від чого, у свою чергу, підвищується ефективність від використання системи керування

Ключові слова: комбайн АМ-75, ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЧАСТОТИ, СКАЛЯРНЕ РЕГУЛЮВАННЯ, СТАТИКА, ДИНАМІКА.

					ЕТФ. КНУ.РБ.141.25.249-04	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

Вступ.....	6
РОЗДІЛ 1. Характеристика електромеханічної системи, вибір електрообладнання та розрахунок характеристик розімкненої системи привода технологічного механізму.....	10
1.1. Основні відомості про технологічний механізм, загальний вид, кінематика і режими роботи.....	10
1.2. Обґрунтування і вибір системи електропривода.....	22
1.3. Розрахунок потужності і вибір електродвигуна.....	26
1.4. Розрахунок перетворювача, вибір елементів силової частини та елементів захисту.....	30
1.5. Складання схеми заміщення, математичний опис і розрахунок механічних і енергетичних характеристик.....	34
РОЗДІЛ 2. Обґрунтування і розробка системи керування електроприводом.....	46
2.1. Обґрунтування і вибір структури системи керування електроприводом.....	46
2.2. Розрахунок параметрів елементів системи керування електроприводом.....	49
2.3. Розробка алгоритмів та програмного забезпечення мікропроцесорної системи керування електроприводом	50
РОЗДІЛ 3. Моделювання динамічних режимів роботи привода механізму на ЕОМ.....	56
3.1. Моделювання статичних та динамічних режимів замкненої системи в пуско-гальмівних режимах та при навантаженні.....	56
3.2. Аналіз якісних показників розробленої системи керування	65
Висновки	67
Список використаних джерел	69

					ЕТФ. КНУ.РБ.141.25.249-04	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вступ

Відомо, що гірнича промисловість є фундаментом для економіки. Ступінь її розвитку та номенклатура видобутих корисних копалин визначає рівень розвитку машинобудування та інших галузей із високою доданою вартістю. Україна має значні запаси критично важливої сировини та рідкісноземельних металів, необхідних для технологічного розвитку.

За словами Світового економічного форуму, в Україні є 20000 родовищ корисних копалин різних 116 типів, причому 3055 з них (15%) розроблялися до повномасштабної агресії Росії в 2022 році.

Міністерство економіки України стверджує, що на нашій території є 22 з 34 видів корисних копалин, які перераховуються серед "критичних" згідно із Законом ЄС про сировинні критичні матеріали (CRMA), прийнятим у 2024 році, спрямованим на зменшення залежності ЄС від геостратегічних конкурентів (наприклад, Китай), по матеріалам, необхідним для виробництва високотехнологічної продукції.

Київська школа економіки вважає, що Україна видобуває 6% від виробництва титану у світі, який використовується у військовій, аерокосмічній та медичній сферах, а також посідає 5-те місце у світі з видобутку галію, який використовується для напівпровідників.

Також Україна знаходиться у провідній п'ятірці країн світу з розвіданих запасів графіту, який використовується для батарей в електромобілях, а також знаходиться в десятці провідних країн світу за запасами марганцю, вуглецю, урану, титану та заліза.

Також на території України, імовірно, є значні запаси рідкісних земель – це група з 17 елементів, які застосовуються у складних пристроях, таких як вітряні турбіни, магнітно-резонансні томографи та смартфони.

					ЕТФ. КНУ.РБ.141.25.249-04	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Хоча розвідані обсяги рідкісноземельних металів не відомі, але за інформацією ООН, вони в Україні становлять 5% світових запасів.

Останнім часом Китай обмежив або призупинив експорт критичних видів



Рис.1. Схема розташування корисних копалин України на карті

сировини до США та ЄС, що змушує їх диверсифувати ланцюжки поставок з огляду на різке зростання попиту.

Нещодавно, у 2021 році, ЄС та Україна уклали угоду щодо стратегічного партнерства щодо сировини, яка має "допомогти в диверсифікації, зміцненні безпеки постачань для обох сторін".

Єврокомісія 4 червня 2025 року ухвалила перші 13 стратегічних проєктів за межами ЄС, які спрямовані на підвищення економічної безпеки союзу за допомогою диверсифікації джерел постачання стратегічної сировини.

					ЕТФ. КНУ.РБ.141.25.249-04	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

Шість із них розташовані в наступних країнах (Україна, Казахстан, Канада, Норвегія, Замбія, Сербія), два поза материками (Нова Каледонія та Гренландія), а решта – у Мадагаскарі, Бразилії, Малаві, Великобританії та ПАР.

Український проект – родовище графіту в Балахівці. Проект здійснюється ТОВ "Розвиток Побужжя" (Група BGV) (один із власників якого також співвласник АТБ) та призначене на видобуток графіту для акумуляторних батарей.

В останні роки гірничодобувні компанії, крім стандартної технології видобутку за допомогою буровибухових робіт, а також розпушування та навалювання, розширюють використання методу видобутку корисних копалин під землею та в кар'єрах, за допомогою кар'єрних та видобувкових комбайнів. При цьому при використанні комбайнів досягається значна економія ресурсів, а також підвищення якості кінцевого продукту.

Традиційна технологія видобутку є застосування двох бульдозерів для розпушування та складування породи, а також одного навантажувача для навантаження породи на великовантажний транспорт. Порівняно з трьома машинами, що працюють у кар'єрі, використання кар'єрного комбайна дозволяє значно знизити шумове забруднення.

Використання комбайна також позитивно вплинуло на пилове забруднення. Бульдозери та колісні навантажувачі піднімали багато пилу, що погіршує умови роботи у забої, а комбайн під час роботи всередині фрезерного барабана утримує весь пил.

Зазвичай пласти мають різну товщину і між ними є породні прошарки. Економічність при видобутку корисних копалин значно підвищується при точному поділенні поміж різних матеріалів у забої. Це значно скорочує витрати на переробку. Крім цього, під час роботи комбайна утворюється набагато менше зерна дрібної фракції, оскільки його переробка дорожча, ніж великої фракції.

					ЕТФ. КНУ.РБ.141.25.249-04	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Комбайни за один захід зрізають, подрібнюють та перевантажують породу прямо на навантажувачі. Це значно економить час та знижує витрати на технологічне обладнання.

При використанні комбайнів можна відмовитись від буровибухових робіт. Тоді корисні копалини можна видобувати навіть поблизу житлової забудови, доріг загального користування чи трубопроводів. За допомогою комбайнів можна також видобувати ресурси в зонах відчуження, а також у тонких пластах корисних копалин.

Вибухові роботи багато в чому пов'язані з великими витратами, зі значними трудовитратами та дотриманням вимог контролюючих органів. Таким чином, ухилення від буровибухових робіт спрощує життя гірничодобувникам. Їм не потрібно дбати про потрібні дозволи, наймання сертифікованих спеціалістів для вибухових робіт або ведення супутньої документації для контролюючих органів.

Тому в цій роботі ми приділимо увагу саме питанню модернізації видобуткового комбайну АМ-75 виробництва австрійської фірми Sandik, як перспективному механізму, який у майбутньому має дедалі більше витіснити застарілі технології

					ЕТФ. КНУ.РБ.141.25.249-04	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1. Характеристика електромеханічної системи, вибір електрообладнання та розрахунок характеристик розімкненої системи привода технологічного механізму

1.1. Основні відомості про технологічний механізм, загальний вид, кінематика і режими роботи

Загальні відомості. У практиці здійснення гірничовидобутку на вугільних шахтах поширення набули в основному два способи розробки забою та навантаження гірничої маси: буровибуховий та комбайновий. В даний час використовується все більший обсяг комбайнового способу при неухильному зменшенні об'ємів буровибухової проходки. Це пояснюється нижчепереліченими перевагами комбайнового способу розробки в порівнянні з буропідривним:

менша кількість один за одним виконуваних операцій через поєднання відбійки та навантаження гірської маси в часі, а також установки кріплення та інших допоміжних операцій;

вищі темпи (в 1,5м - 2 рази) проведення виробок;

помітно вища продуктивність праці;

значно краща якість виробок, тому що простіше забезпечувати стабільність їх розмірів та форми;

помітно менша кількість використовуваних у забої машин і, звідси, менший рівень виходів з експлуатації техніки;

значно кращі екологічні умови роботи у забої;

вища безпека робіт.

Багаторічний досвід використання прохідницьких комбайнів дозволив визначити найоптимальніші конструкції комбайнів. На даний час сформувалися два типи комбайнів:

					ЕТФ. КНУ.РБ.141.25.249-04			
Змн.	Арк.	№ документа.	Підпис	Дат				
Розробив.	Губар Б.В				РОЗДІЛ 1. Характеристика електромеханічної системи, вибір електрообладнання та розрахунок статичних характеристик привода.	Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевірів.	Сьомочкин А.Б.						10	36
Рецензія.						КНУ Каф. ЕІ ЕЕМ-21-2		
Н. Контр.								
Затверд..	Сінчук О.М.							

комбайни виборчої дії, які мають виконавчий орган із ріжучою коронкою, встановленою на кінці стріли; з подальшим навантаженням здобутої гірничої маси за допомогою парних лап, що нагрібають; та з остаточним перевантаженням гірської маси за допомогою скребкового конвеєра, оснащені гусеничним ходом;

комбайни бурового типу, які мають роторний різальний орган різного виконання; з навантаженням здобутої гірничої маси за допомогою ковшових навантажувачів на скребковий (або стрічковий) перевантажувач, оснащені ходом, що крокує.

Понад 95% обсягу гірничих виробок за допомогою комбайнів на вугільних шахтах у світі провадиться із застосуванням комбайнів виборчої дії, що мають стріловий виконавчий орган.

Стрілові комбайни найбільш застосовні у вугільних шахтах, де багато пластових виробок. Виконавчий орган такого комбайна виконаний у вигляді жорсткої або стріли, що шарнірно ламається, з коронкою на передньому кінці і електродвигуном з редуктором ззаду.

Стріла може повертатися у вертикальній та горизонтальній площинах, за допомогою гідроциліндрів.

Коронки стрілових комбайнів мають різні форми: сферичну, конічну, циліндричну форму.

Деякі комбайни мають дві ріжучі коронки, які розташовані поперек по відношенню до стріли.

Коронки комбайнів вибіркової дії мають поворотні різці РКС різних типорозмірів, які монтуються тангенціально в різцетримачах коронки. Тангенціальне положення різців та можливість їх повороту в різцетримачах підвищує ефективність руйнування як вугілля, так і порід, що мають коефіцієнт твердості до 6-8 одиниць за Протодьяконовим. Зростає також термін служби самого різця. Для руйнування міцніших порід застосовують інші, радіальні породні різці РПГТ-2.

					ЕТФ. КНУ.РБ.141.25.249-04	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На коронках різцетримач розміщуються по спіралі, що призводить до видалення видобутої породи від забою.

Раціональним рішенням виявилось розташування електроприводу з редуктором просто на стрілі. Це дозволяє розсувати стрілу, за допомогою чого здійснюється зарубка коронок у масив, а не за допомогою подачі комбайна на забій. Вважається, що це підвищує стійкість їх у роботі. Подача комбайна на забій для здійснення чергового циклу виїмки наближає передній край живильника до забою, за допомогою чого проводиться чистіше прибирання відбитої гірської породи.

В результаті експлуатації та досліджень встановлено, що для збирання відбитої породи найбільш оптимальним є прибиральник з лапами, що нагрібають, з бічним вивантаженням на скребковий конвеєр. Цей конвеєр, у свою чергу, перевантажує гірську масу від прибиральника в штрековий конвеєр, вагонетки або інший транспорт. Як правило, розвантажувальна стріла конвеєра може повертатися в різні боки, а може змінювати висоту розвантаження породи на транспорт, що під'їжджає ззаду до комбайна.

Подібний перевантажувальний пристрій може переміщати гірську масу в похилій виробці, що здійснюється падіння пласта.

Більшість стрілових комбайнів обладнані стрічковими перевантажувачами, які дозволяють відвантажувати відбиту породу в шахтні вагонетки.

Основним варіантом для переміщення комбайна зі стрілоподібним органом є гусеничний механізм, який дозволяє швидко переміщати комбайн на нову позицію, а також переганяти в інший вибій. Останні моделі комбайнів зі стрілоподібним органом обладнуються гідрофікованими виносними опорами - по дві опори на кожну бічну сторону комбайна, що забезпечує його стійкість.

					ЕТФ. КНУ.РБ.141.25.249-04	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Привід гусеничного ходу комбайнів зазвичай є електричним. Деякі моделі оснащені індивідуальним приводом кожної гусениці. Це підвищує маневреність і, як вважається, це полегшує управління процесом ходу.

Комбайни на гусеничному ходу призначені для здійснення виробок із кутами до $\pm 12^\circ$. Використання їх для великих кутів нахилу викликає необхідність утримання комбайна від сповзання вниз за допомогою спеціальних лебідок, а при здійсненні повстання - спеціальних пристроїв для забезпечення робочого зусилля на забій. Обмеженням на проходці ухилів є кут нахилу виробок в $15-18^\circ$, при якому починає порушуватися робота навантажувальних пристроїв і насамперед перевантажувачів.

Комбайни вибіркової дії зазвичай обладнуються системою придушення пилу, що складається з системи зрошення за допомогою форсунки зони руйнування та системи пиловідсмоктування для прибирання зони забою від запиленого повітря. Рідина для зрошення надходить від насосної установки, встановленої у виробітку, що прилягає до прохідної. Установку для придушення пилу розміщують прямо в виробітку.

Гідропривід комбайна вибіркової дії здійснює за допомогою гідроциліндрів поворот коронки разом зі стрілою паралельно до ґрунту, а також гідроциліндрів для їх переміщення вгору-вниз; за допомогою гідроциліндра столу - поворот та переміщення вгору-вниз розвантажувального кінця конвеєра, натяг скребкового ланцюга; включення фрикціонів механізму ходу та гідравлічних опор. Гідросистема комбайна складається також з маслонасосу, маслобака, гідророзподільників, гідророзведення, регулюючої та запобіжної гідроапаратури.

До складу електрообладнання комбайна входять: електродвигуни різних механізмів, магнітна станція управління, освітлювальна фара, запобіжна та сигнальна апаратура, дозволені до застосування в шахтах, небезпечних по пилу та газу.

					ЕТФ. КНУ.РБ.141.25.249-04	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Управління комбайном здійснюється оператором за допомогою пульта, перебуваючи у кабіні, розташованій на комбайні. Деякі комбайни управляються за допомогою дистанційного пульта.

Найновіші комбайни з високою енергоозброєністю повністю автоматизовані. У такому разі всі операції, що здійснюються комбайном, заносяться до блоку автоматичного управління і тоді комбайн працює відповідно до програми, яку задає оператор.

Система автоматичного управління, як правило, здійснює запис послідовності операцій циклу роботи, відтворення циклу роботи з цього запису; також стабілізується задане навантаження електродвигуна коронки щодо руйнування матеріалу з одночасним захистом двигуна від перевантаження та перекидання.

Бурові комбайни в кілька разів складніші за конструкцією стрілоподібних і, звідси, дорожче коштують. З цієї причини комбайни бурового типу використовують при здійсненні виробок по породах високої твердості (до 15-17 одиниць за Протодьяконовим) і значною протяжністю (мінімум 800-1000м). У цьому обов'язкова стабільність гірничотехнічних характеристик. За наявності різних аномалій (скидів, зрушень, вивалів, великих тріщин та інших.) значно ускладнюється нормальна робота комбайна.

З цих причин роторні комбайни в основному використовуються для створення протяжних польових штреків, а також для формування квершлагів до нових шахтних полів.

Технічна характеристика комбайна АМ-75. Нижче наведене фото нового комбайна з незношеними різцями, в транспортному стані:

					ЕТФ. КНУ.РБ.141.25.249-04	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рис.1.1. Фото комбайна АМ-75 в транспортному стані

Далі наведено схематичне зображення того ж комбайна з коментарями щодо складових частин комбайна (рис. 1.2).

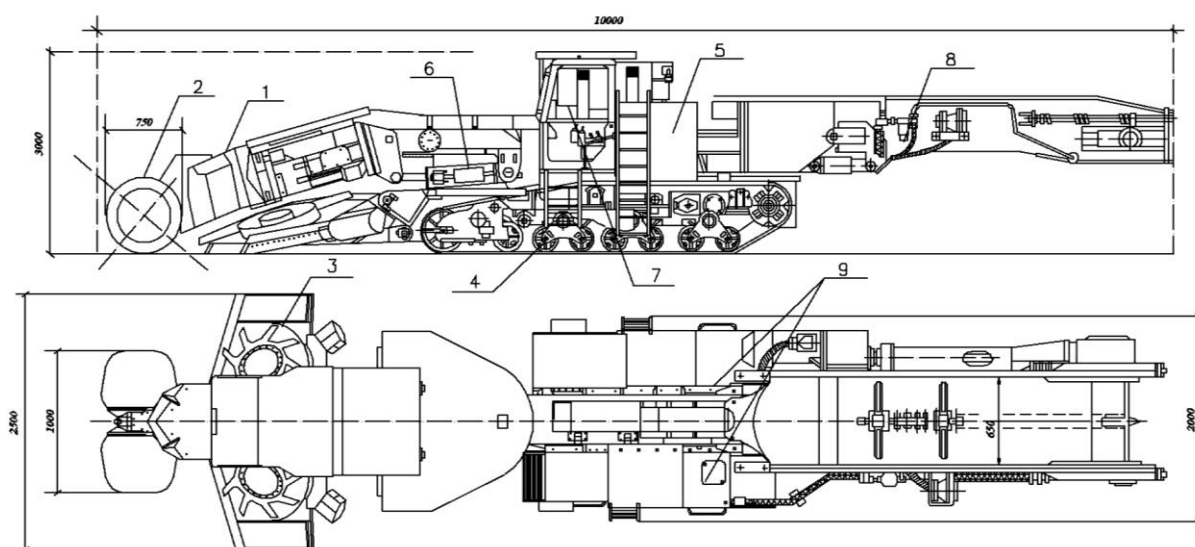


Рис. 1.2. Зовнішній вигляд комбайна: 1 - підвіска виконавчого органу, 2 - основний технологічний орган, 3 - навантажувач з лапами, що нагрібають, 4 - ходовий механізм гусеничного типу, 5 - корпус видобувного комбайна, 6 - гідроциліндри основного органу, 7 - кабіна управління, 8 – шкребковий конвеєр комбайна (з маслостанцією та управлінням)

Комбайн є машиною з робочим органом у вигляді стріли з коронкою, яка вкрита зубцями як ріжучими інструментами, як це показано на рис.1.3.:

					ЕТФ. КНУ.РБ.141.25.249-04	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15



Рис.1.3. Фото комбайна у забої у робочому положенні

У такого комбайна типу АМ-75 на коронці 72 зуби із загартованого металу. Зуби схильні до зносу (див. фото рис.1.4), тому вони кожну зміну оглядаються і при необхідності замінюються на нові.



Рис.1.4. Зовнішній вигляд зубів коронки комбайна після тривалої роботи

Для переміщення видобутої руди від комбайна до рудоспуску використовуються НДМ - навантажувально-доставні машини, фото яких наведено на рис. 1.5.

					ЕТФ. КНУ.РБ.141.25.249-04	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рис. 1.5 Фото НДМ під час операції навантаження

НДМ переміщують породу до рудоспусків (тунелів, призначених для спуску руди під дією сили тяжіння з робочого виробітку на транспортний горизонт, розташований нижче), потім вагонетки транспортного горизонту переміщують породу до капітального рудоспуску, по якому порода також під дією сили тяжіння спускається в спуск. Більш детально технологію роботи власне механізмів комбайна буде розглянуто в наступному пункті.

Комбайн типу АМ 75 є найпоширенішою у світі моделлю свого класу. Максимальна ефективність використання комбайна впливає із високої продуктивності та експлуатаційної готовності. Вона також підтверджується порівняльною залежністю продуктивності комбайнів різних виробників від міцності порід, наведеної на рис. 1.6.

					ЕТФ. КНУ.РБ.141.25.249-04	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17



Рис. 1.6. Залежність продуктивності різних комбайнів (включаючи АМ-75) від міцності порід

Продуктивність моделей АМ-75 залежить від поздовжньої швидкості переміщення ріжучої коронки як знизу догори так і зверху донизу. АМ-75 призначений для проходження виробок перетином від 13 до 28 м² крізь породи міцністю до 120 МПа, при цьому він здатний різати вкраплення порід, що окремо трапляються, міцністю до 140 МПа.

У табл. 1.1 представлені коротка технічна характеристика різних варіантів комбайна, що розглядається.

Таблиця 1.1. Технічна характеристика

Показники	Марка комбайна	
	АМ-75-Д для прохідницьких робіт	АМ-75-Р для очисних робіт
Маса, т	50	54
Довжина загальна, мм	10300	12400
Висота комбайна, мм	1685/1850	1930/2600
Ширина комбайна, мм	2900	3000
Ширина вантажного полка, мм	2800-5620	5700
Тиск на ґрунт, Н/см ²	13	14
Загальна встановлена потужність, кВт	287/342	342

Двигун ріжучого органу, кВт	160/200	200
Двигун вантажно-транспортного пристрою, кВт	2х36	2х36
Двигун гідроприводу, кВт	55/70	70
Двигун конвеєру, м/с	1,1	1,8
Швидкість руху, м/хв	4,2-8,8	4,2-8,8
Прохідні ухили та підйоми (максимум), град	±18	±18
Швидкість різання (обертання коронки), м/с	3,0/3,55	3,4/4,0

Опис технології роботи комбайну АМ-75. Розглянемо схеми формування забою (рис. 1.7 та 1.8) за допомогою комбайнів типу АМ. На очисних роботах ріжуча коронка здійснює рухи зверху донизу або знизу вгору по висоті забою, переміщення вліво-вправо не практикується.

На різальній коронці можуть бути відсутні різці для поперечної обробки забою. Тому після кожного проходу коронки після забою її необхідно відсувати від робочої поверхні за допомогою механізму ходу комбайна. В основному для роботи в забої використовується схема 1 (рис. 1.7.), яка має найнижчу витрату енергії на руйнування забою. Тут цифрами 1, 2, 3 показано послідовність відпрацювання забою.

Різниця між комбайнами для прохідницьких та очисних робіт полягає в тому, що у прохідницького комбайна немає холостого переміщення ріжучої коронки, а для очисних комбайнів – є. Очисні комбайни мають більш ефективну експлуатаційну та технічну продуктивність через високу швидкість холостого проходу та переміщення різальної коронки послідовно за положеннями 1, 2, 3. Це особливо добре проявляється при роботі на міцних рудах з $f = 8-10$ за Протодьяконовим.

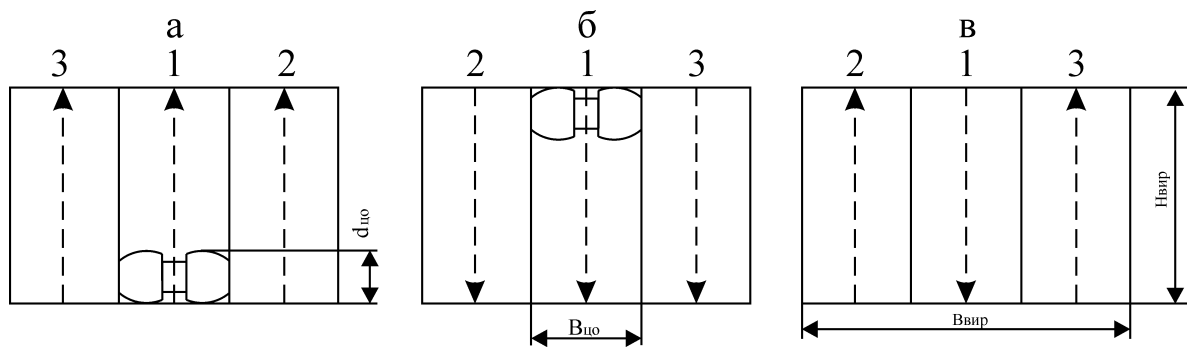
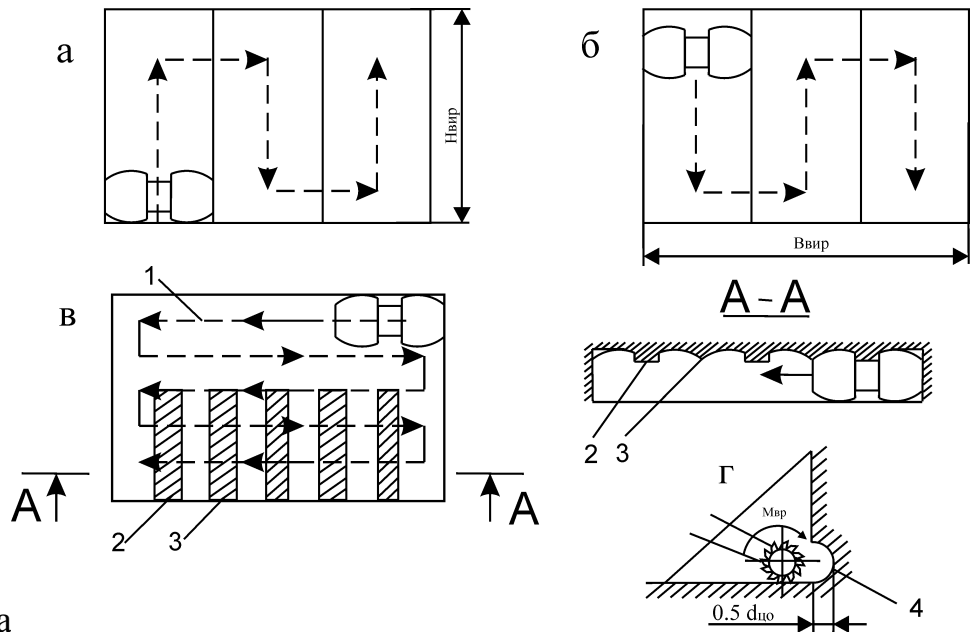


Рис. 1.7. Схеми роботи у забої: а – знизу-вгору; б - зверху-вниз; в -



комбінована

Рис.1.8 Схеми роботи у забої при безупинній роботі коронки: а – знизу-вгору; б - зверху-вниз; в - зачищення виступів ціликів; г - забурювання коронки

Розрахуємо обсяги Q в кубометрах руди, що видобувається, за один робочий цикл і на один погонний метр проходки очисного вироблення. Об'єм робіт орієнтовно для комбайнів АМ-75 можна визначити за допомогою наступної формули:

$$Q_{\text{цикл}} = K_1 \cdot d_{\text{цo}} \cdot B_{\text{цo}} \cdot H_{\text{вир}} \cdot (m + n)$$

де $K_1 = 0,1-0,5$ - коефіцієнт заглиблення коронки (для циліндроподібної форми); $d_{\text{цo}} = 1,05$ м – діаметр ріжучої коронки для АМ-75; $B_{\text{цo}}$ – ширина циліндроподібної коронки (для АМ-75 – 1682 мм); $H_{\text{вир}} = 3$ м - висота вибою; m – кількість повних робочих проходів (1-3) за один робочий цикл роботи

					ЕТФ. КНУ.РБ.141.25.249-04	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

очисного комбайна; n – кількість неповних робочих проходів (0,1 – 0,9), яка залежить від величини $B_{ц0}$. Якщо ж n більше 3, слід вважати, що комбайн працює на очисних роботах як вугільний.

$$Q_{\text{цикл}} = 0.5 \cdot 1.05 \cdot [1.682 \cdot 3 \cdot 2] = 5.292 \text{ м}^3/\text{ц}$$

Розрахуємо обсяг видобутої руди Q на 1 метр довжини виробітку

$$Q_{\text{уход}} = 1 \cdot 1.05 \cdot [1.682 \cdot 3 \cdot 2] = 10.584 \text{ м}^3/\text{м}$$

Технічна продуктивність комбайнів (у кубометрах за одну хвилину) розраховується так:

$$Q_{\text{хр.тех}} = Q_{\text{уход}} / t_{\text{уход}},$$

$$Q_{\text{хр.тех}} = 10.584 / 10.6 = 1.0 \text{ м}^3/\text{хв}$$

де $t_{\text{уход}}$ - час відбивання одного кубометра.

Розрахуємо технічну продуктивність за хвилину:

$$Q_{\text{тех/мин}} = Q_{\text{тех}} \cdot 60 \cdot \sqrt[3]{K_{\Gamma} + t_{\text{пк}} / t_{\text{р}}}$$

де $K_{\Gamma} = 0,9-0,95$ - коефіцієнт готовності комбайнів (за рахунок надійної конструкції, швидкості демонтажу, простоти обслуговування, заміни деталей та вузлів). Система автоматичного контролю моніторить несправності і вказує вузли, що відмовили: $t_{\text{р}}$ - час роботи АМ-75 за один робочий цикл з очищення забою (для очисних комбайнів час становить 50-55 хв, для прохідницьких комбайнів - 40-50 хв); $t_{\text{пк}}$ - час технічних простоїв комбайна. Цей час становить для комбайнів для очисних робіт – 5-10 хв, для прохідницьких робіт – 10-20 хв.

Враховуючи початкову проектну потужність рудника, а також в результаті систематичних спостережень розраховано середню годинну продуктивність комбайна - 60 м³/год при міцності порід $f = 5$ за Протодьяконовим:

$$Q_{\text{тех/мин}} = 60 / 60 \cdot \sqrt[3]{0.052 + 0.2} = 0.98 \text{ м}^3/\text{хв}$$

У такому разі вказану продуктивність за одну хвилину забезпечить наступну швидкість подачі

$$V_{\text{v}} = 1.0 / 60 \cdot 0.25 \cdot 1.682 = 0.05 \text{ м/с}$$

					ЕТФ. КНУ.РБ.141.25.249-04	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де 0,25 м - середня глибина занурення коронки, що змінюється не більше 0,1-0,5 м.

Розрахункова швидкість подачі коронки в забій відноситься до міцності порід 50 МПа і повністю відповідає наступним жорстким вимогам камерно-ціликової системи розробки. З використанням закладки, що твердіє, при коефіцієнті зсуву руйнування порід 60 МПа, годинна продуктивність складе $50 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Для забезпечення безперервної роботи комбайна необхідно, щоб його забезпечували як мінімум дві навантажувально-доставні машини. Якщо довжина доставки зростає, це призведе до необхідності використовувати вже три НДМ. На рис. 1.9 показана схема роботи комбайна з трьома НДМ при максимальній довжині доставки (L_{max}).

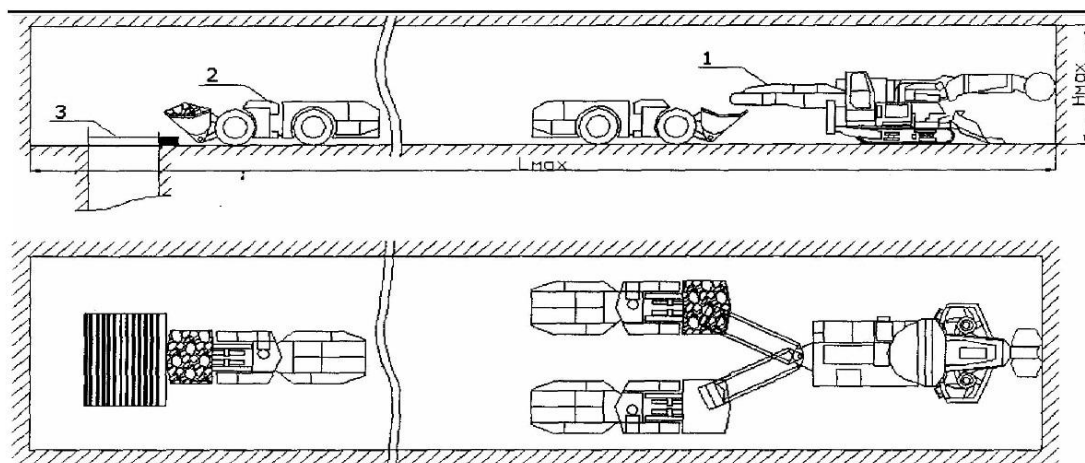


Рис. 1.9. Схема спільної роботи комбайна з НДМ: 1 – комбайн; 2 – НДМ; 3 – рудоспуск.

1.2. Обґрунтування і вибір системи електропривода.

Нижче наведено скан типової силової схеми основних робочих механізмів комбайна АМ-75 (рис.1.10). Схема електроприводу механізму пересування не відображена.

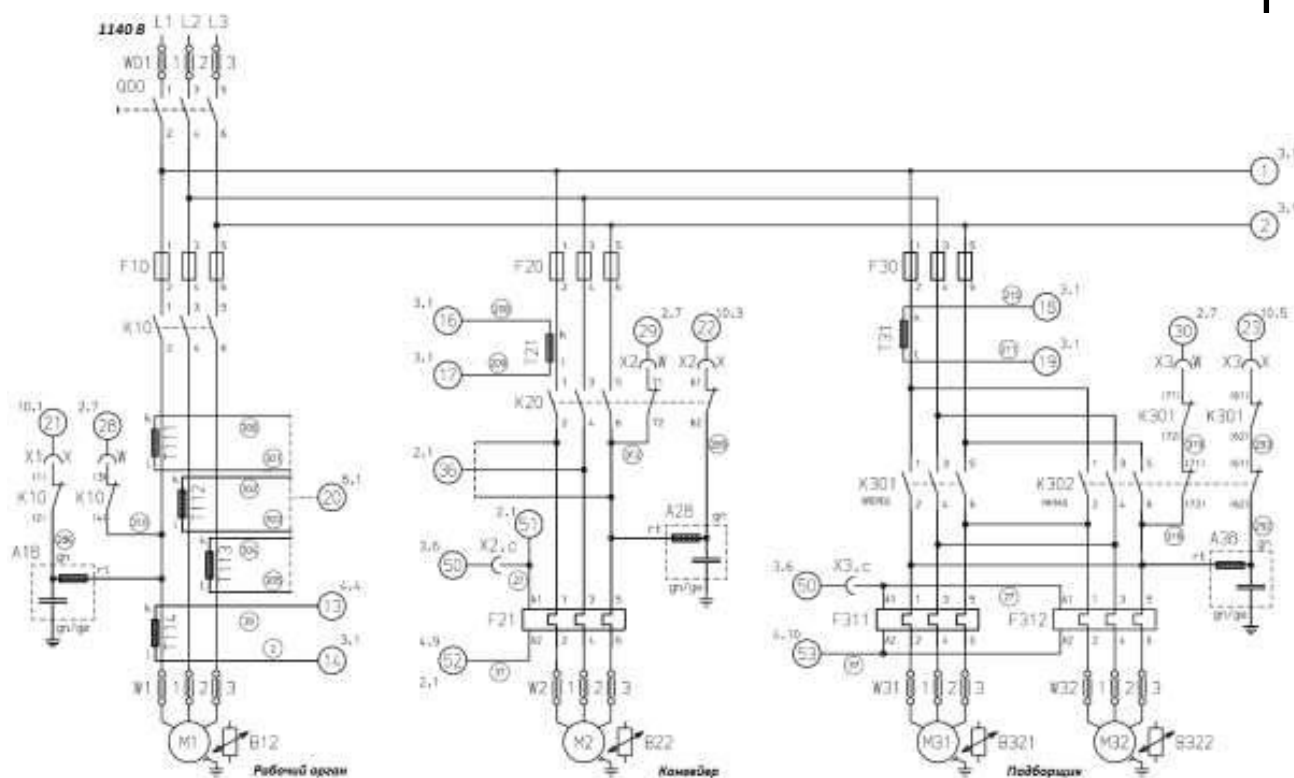


Рис.1.10. Силова схема основного електроустаткування видобувного комбайна

Електропостачання комбайна здійснюється від підстанції, що знаходиться в підземній частині копальні, яка має напругу 1140 В (1,2 кВ). Пуск двигунів комбайна невеликої потужності здійснюється за допомогою магнітного пускача, який складається із силового контактора змінного струму та двох запобіжних теплових реле. Щоб запустити двигун, спочатку замикають рубильник, який подає живлення в електропривід. Він також призначений для блокування подачі напруги на схему при тривалій зупинці приводу, при періодичному огляді або ремонті двигуна або пускача. У схемі реалізовано захист двигуна з ланцюгами керування від к.з. (за допомогою плавких запобіжників), а також навантаження двигуна (за допомогою теплових реле). При зниженні величини напруги мережі до значення 60% від номінального або повного зникнення напруги здійснюється розрив блокувальних та головних контактів, і двигун відключається від мережі. Для двигунів великої та середньої потужності також використовуються магнітні

станції, до яких входять контактори, реле максимального струму, теплові реле з рубильниками. Якщо необхідно реверс електроприводу (тільки для підбирача), то використовують спеціальну схему управління з силовими перемикачами, що реверсують (контакторами або магнітними пускачами)..

На схемі вихідними висновками, що закінчуються кружками, вказано на додаткове обладнання комбайна: 1, 2, 13-19 – до вимірювальної підсистеми (яка містить вольтметри, амперметри); 20 - підсистема контролю напруги; 21, 22, 23 - підсистема контролю замикаання на землю; 28, 29 30 - підсистема перевірки реле витоку; 36 – підсистема насосів циркуляції, водо- та маслоохолоджувача; 50-53 - підсистема теплових реле. Як видно, основний механізм оснащений асинхронним двигуном без будь-якого перетворювача електричної енергії. Тобто регулювання швидкості жодним із робочих механізмів немає. Для пари "підбирач-конвеєр", можливо, і потрібен регульований електропривод, тому що можлива ситуація, коли шарошка обробляє досить легкі породи, і на підбирач надходить більше матеріалу, ніж зазвичай, тоді необхідно буде збільшувати швидкість конвеєра. Але слід мати на увазі, що такий варіант не слід брати до уваги, тому що легкі породи можуть легко обсипатися, і комбайну буде заборонено працювати з ними без супроводу механізованими кріпленнями. Тобто без таких кріплень, можливо, комбайну допустимо працювати з породами твердістю за Протодьяконовим не менше якогось певного значення, тільки в такому разі камера, що формується комбайном, буде досить стійкою, і тримати форму. З іншого боку, при роботі шарошки з твердими породами відпрацьована порода накопичується не швидко, і, можливо, варто було б зменшити швидкість, а значить і інтенсивність роботи підбирача, і разом з ним конвеєра. У будь-якому випадку це питання вимагає додаткового та ретельного опрацювання, але в даній роботі ми зупиняємось на модернізації саме головного приводу. Як відомо, швидкість обертання шарошки підібрана такою, щоб різці оптимально кришили породу у всіх сенсах. Таким чином, комбайн буде не універсальним.

					ЕТФ. КНУ.РБ.141.25.249-04	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Його не можна буде використовувати для обробки як більш твердих порід, так і більш м'яких порід (у кар'єрах, наприклад, вони можуть обробляти стінки, тут немає небезпеки обвалу). Та й при проходженні лави можлива ситуація, коли комбайну зустрічатимуться породи різної фортеці. У такому разі для досягнення оптимальних режимів різання породи слід на твердих породах зменшувати швидкість обертання шарошки, а на м'яких породах збільшувати. Вивчаючи схему рис. 1.10, можна зробити висновок, що якщо використовується асинхронний електродвигун (модернізацію приводу із заміною двигуна на інші принципи його роботи ми не розглядаємо, тому що цей шлях значно і невиправдано подорожчає модернізацію), то ми можемо додатково використовувати наступні силові перетворювачі енергії: тиристорний регулятор напруги (ТРН), перетворювач частоти (ПЧ)). Розглянемо кожен варіант окремо.

1. ТРН. Незважаючи на очевидну дешевизну (як відомо, тиристори є одними з недорогих напівпровідникових приладів навіть у галузі високих потужностей), його регуляторні можливості насправді дуже обмежені. Відомо, регулювання швидкості двигуна з використанням ТРН йде досить штучним способом. За допомогою зворотного зв'язку швидкість двигуна дійсно підтримується на рівні нижче за номінальну, але швидкість обертання магнітного потоку залишається максимальною. За рахунок великої різниці між швидкостями магнітного потоку та ротора в роторній обмотці виникали б значні струми, що можуть перегріти двигун, і вивести його з ладу. З цієї причини система ТРН-АД завжди забезпечується резисторами в роторному ланцюзі АД. Але резистори ставлять питання з енергетичними показниками використання системи ТРН-АД, адже на резисторах витрачається велика кількість теплової енергії. Але, у нашому випадку асинхронний двигун явно має короткозамкнений ротор, тому, якщо і можна використовувати його в системі ТРН-АД,

					ЕТФ. КНУ.РБ.141.25.249-04	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

то тільки на невеликий час, щоб не перегріти асинхронний двигун, наприклад, при пуску або невеликому зниженні швидкості ротора. Тривала робота АД від ТРН при глибокому регулюванні швидкості взагалі виключена.

2. НПЧ-АД. Проблем із перегріванням двигуна, як у системі ТРН-АД, взагалі немає. І вартість в принципі не набагато більша, ніж у ТРН, тому що НПЧ складається з тих самих тиристорів. Але є інші проблеми. Специфіка роботи НПЧ така, що вихідна стабільна частота неспроможна становити більше 30 % від вхідної частоти. Тобто при встановленні НПЧ ми відразу матимемо максимальні 15 Гц для живлення асинхронного двигуна. Одним з можливих способів рішення могло бути подача вхідної напруги частотою 167 Гц. Але такі інженерні рішення на практиці невідомі, по-перше. По-друге, модернізація системи електропостачання зі значною зміною параметрів теж не є раціональним варіантом модернізації.

3. Залишається найдорожчий варіант - перетворювач частоти зі ланкою постійного струму, але він має високу гнучкість для використання з асинхронним двигуном комбайна. По-перше, діапазон зміни швидкості система забезпечує найвищий серед усіх систем регульованого електроприводу, по-друге, хоча це не зовсім актуально для приводу шарошки комбайна – привід має високу точність підтримки швидкості обертання. До того ж, якщо використовувати ПЧ-АД з активним випрямлячем, то енергетику також можна значно покращити – довести за допомогою системи управління коефіцієнт потужності до 1.

Таким чином, з усіх трьох розглянутих систем приводу на базі АД ми вибираємо систему ПЧ-АД.

1.3. Розрахунок потужності і вибір електродвигуна.

					ЕТФ. КНУ.РБ.141.25.249-04	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Проведемо орієнтовний розрахунок та вибір двигуна для найпотужнішого механізму – основного робочого органу комбайна – коронки.

1. Розрахункове зусилля для обертання коронки комбайна для холостого ходу:

$$F_{xx} = m_{PO} \cdot g \cdot \mu = 5000 \cdot 9.8 \cdot 0.15 = 7350 \text{ Н}$$

де μ - коефіцієнт тертя коронки варіюється від 0,1 до 0,15.

2. Розрахункове зусилля різання коронки по породі:

$$F_p = m_{PO} \cdot g \cdot \rho \cdot \mu = 5000 \cdot 9.8 \cdot 2.44 \cdot 0.5 = 59780 \text{ Н}$$

де ρ - щільність породи, що розробляється (для міцності $f > 6$ $\rho = 2,44$ т/м³); μ - (приймається 0,4÷0,6).

3. Час холостого ходу визначаємо як проміжок часу від запуску електродвигуна до підходу до робочого місця забою та навпаки, в кінці роботи до вимкнення двигуна назад:

$$t_{xx} = \frac{L_p}{V_{II}} = \frac{16}{3.5} = 4.6 \text{ хв}$$

де L_p – відстань, що долає комбайн від місця стоянки (парковки) до вибою; V_{II} – середня величина швидкості комбайна, що приймається в діапазоні від 0 до 8,8 м/хв.

4. Розрахунковий час роботи коронки комбайна під навантаженням визначається як:

$$t_p = \frac{S_B \cdot Q_{PO} \cdot \rho \cdot 1000}{V_{PO} \cdot m_{PO}} = \frac{24 \cdot 0.5 \cdot 2.44 \cdot 1000}{138 \cdot 5} = 43.4 \text{ хв}$$

де $S_B = 24 \text{ м}^2$ – поперечна площа виробітку; $V_{PO} = 2,3 \text{ м/с}$ чи 138 м/хв – лінійна швидкість обертання поверхні робочого органу (коронки) комбайна.

					ЕТФ. КНУ.РБ.141.25.249-04	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5. Тоді розрахунковий час циклу:

$$t_{\text{ц}} = 2 \cdot t_{\text{хх}} + t_{\text{р}} = 2 \cdot 4.6 + 43.4 = 52.6 \text{ хв}$$

6. Розрахункове еквівалентне зусилля на коронці під час вибірки породи:

$$F_{\text{ЕКВ}} = \sqrt{\frac{2 \cdot F_{\text{хх}}^2 \cdot t_{\text{хх}} + F_{\text{р}}^2 \cdot t_{\text{р}}}{t_{\text{ц}}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 350^2 \cdot 4.6 + 59780^2 \cdot 43.4}{52.6}} = 54400 \text{ Н}$$

7. Орієнтовно потужність електродвигуна розраховується за формулою:

$$N = \frac{F_{\text{ЕКВ}} \cdot Q_{\text{рО}}}{V_{\text{рО}} \cdot 100 \cdot \eta} = \frac{54400 \cdot 0.5 \cdot 10^3}{2.3 \cdot 100 \cdot 0.8} = 147800 \text{ Вт}$$

де $\eta = 0,8$ - ККД механізму приводу коронки

8. Розрахункову потужність двигуна збільшимо на 10-15% для забезпечення запасу, а також надійності роботи та обліку можливих перевантажень. Остаточна потужність є настановною:

$$N_{\text{уст}} = 1.15 \cdot N = 1.15 \cdot 147800 = 169970 \text{ Вт.}$$

Час робочого циклу комбайна те саме для всіх його робочих механізмів і відповідає часу проходження однієї смуги (з шириною зарубного бару) у забої. Наставна потужність визначає мінімальну необхідну потужність двигунів робочих механізмів для забезпечення необхідних зусиль під час їх роботи.

Кінематична схема головного робочого механізму комбайна показана на рис. 1.11.

Таблиця 2. Результати розрахунку параметрів головного робочого механізму комбайна

Показник	Величина
Зусилля при холостому ході,	7350
Робоче зусилля, $F_{\text{р Н}}$	59780

Еквівалентне зусилля, Гекв, Н	54400
Час холостого ходу, t_{xx} , хв	4,6
Час роботи, t_p , хв	43,4
Час циклу, $t_{ц}$, хв	52,6
Попередня потужність, N, Вт	147800
Настановна потужність, N, кВт	170

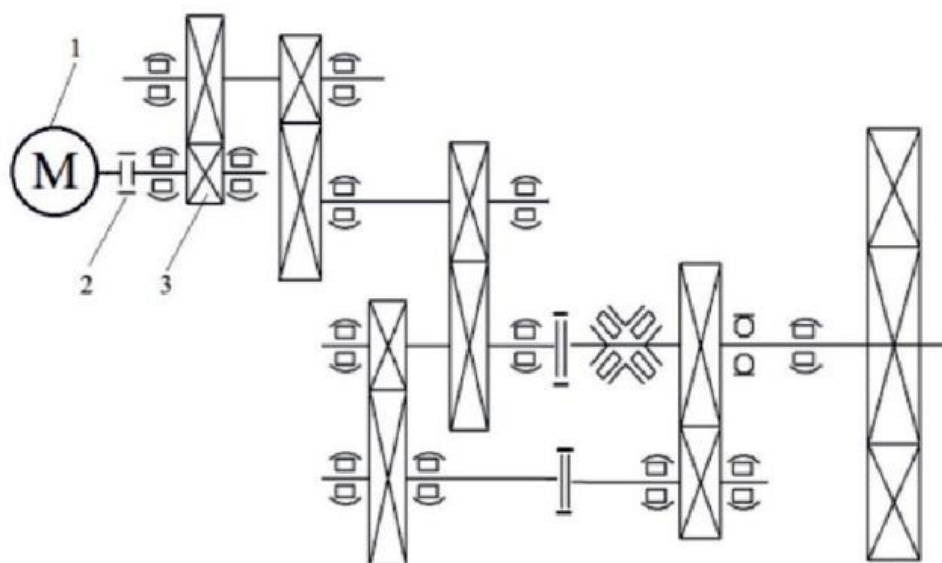


Рис. 1.11. Кінематична схема основного робочого механізму комбайна; 1 - двигун, 2 - муфта, 3 - циліндрична передача, 4 - передача кінцева

Враховуючи результати попереднього розрахунку, та виходячи з параметрів наведеної на рис. 1.11 кінематичної схеми, вибираємо з літературних джерел відповідний за потужністю та за напругою АД з короткозамкненим ротором.

Таблиця 1.3. Параметри електродвигуна основного робочого органу комбайна

Марка електродвигуна	4A315M4Y3
Висота осі валу, h	315 мм
Потужність номінальна, P_H	200 кВт

Частота обертання синхронна, n_1	1500 об/хв
Частота обертання номінальна, n_H	1480 об/хв
Ковзання номінальне, S_H	1,3 %
Коефіцієнт корисної дії, η	0,94
Коефіцієнт потужності, $\cos\varphi$	0,92
Напруга номінальна, U_H	1140 В
Кратність пускового струму до номінального струму, I_{II}/I_d	6,0
Кратність пускового моменту до номінального моменту, M_{II}/M_H	1,3
Кратність максимального моменту до номінального моменту, M_M/M_H	2,2
Величина моменту інерції, J	3,63 кг·м ²
Кількість пар полюсів, $2p$	2

1.4. Розрахунок перетворювача, вибір елементів силової частини та елементів захисту

Підбір перетворювача частоти (ПЧ) зазвичай виконується за наступними умовами:

$$I_{ПЧ} \geq I_{НОМ.ДВ}; \quad U_{ПЧ} \geq U_{НОМ.ДВ}.$$

$$\text{Тут } I_{НОМ.ДВ} = \frac{P_H}{\sqrt{3} \cdot U_H \cdot \cos\varphi_H \cdot \eta_H} = \frac{200000}{\sqrt{3} \cdot 1140 \cdot 0.92 \cdot 0.94} = 117 \text{ А};$$

$$U_{НОМ.ДВ} = 1140 \text{ В}.$$

Враховуючи умови вибору, а також умову, що ПЧ повинен працювати в умовах, небезпечних за пилом та газом, бути вибухонебезпечним, обираємо вибухозахищений ПЧ з повітряним охолодженням марки СУ-РВ ПЧ-1140-250 (1140В, 250 кВт), який призначений для регулювання окремо частоти та окремо напруги, а також для контролю та оптимального управління пуском та зупинкою АД, та здійснення всіляких захистів.

					ЕТФ. КНУ.РБ.141.25.249-04	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Основні сфери застосування: в стрічкових та скребкових конвеєрах, насосах, вентиляторах, а також у гірничих виробках копалин і шахт, включаючи небезпечні по рудничному газу, а також пального пилу.

Захисти, якими обладнано ПЧ:

- Пофазний струмовий захист від перевантажень та КЗ на землю;
- Захист від включення електродвигуна в мережу при погіршенні якості ізоляції в кожній фазі (якщо опір ізоляції менше 30 або 100 кому);
- Захист від перегріву електродвигуна;
- Захист від обриву заземлення та збільшення його опору (при роботі на рухомому об'єкті);
- Захист від перекидання;
- Захист від самоувімкнення вихідної напруги ПЧ та при різкому (фронт до 0,1с) зростанні напруги мережі до 150%;
- Захист від витоку струму за допомогою вбудованого реле витоку;
- Захист від обривів фази на вході та на виході;
- Захист від “дурня” (блок-контакти на відкривання при увімкненій напрузі)

Основні характеристики ПЧ:

- Зміст вищих гармонік в мережі живлення (5, 7, 11, 13 і тощо) не більше 25%;
- Індуктивність мережного дроселя обмежує провали напруги трохи більше $U_k=4\%$;
- Можливість безштовхового підключення до електродвигуна, що обертається;
- Висока жорсткість механічної характеристики через компенсацію ковзання;
- Підтримка контакторів увімкненими при падінні напруги до 0,65 $U_{ном}$
- Автоматична зупинка приводу при зниженні напруги нижче 0,65 або підвищенні більше 1,35 від номінальної величини

					ЕТФ. КНУ.РБ.141.25.249-04	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Система управління працює на високозахищеній шині RS 485, що має струмові та дискретні входи та виходи
- Перевірка працездатності ПЧ у режимі “Тест” без подачі напруги на силові затискачі

Технічні характеристики ПЧ:

Напруга:	1140В
Потужність номінальна:	250 кВт
Номінальний вихідний струм:	130 А
Охолодження:	Повітряне
Напруга живлення:	970 ~ 1310 В
Частота живлення:	47-63 Гц
Режим роботи:	Чотирьох квадрантний
Варіанти керування:	Векторне бездатчикове (SVC), векторне (VC), скалярне U/f
Варіанти скалярного керування:	Лінійний, за точками, за допомогою кривий «напруга-частота»
Варіанти керування:	З панелі ручного керування, по дискретним входам-виходам, по мережі
Завданні значення швидкості:	Аналоговий сигнал, цифровий сигнал частоти, що повторюється, сигнал з ПЛК, сигнал з ПД-регулятора, сигнал по мережі, і тощо. Усі режими перемикаються та поєднуються.
Межі перевантажень:	60 с при 150% від номінального струму 10 с при 180% від номінального струму
Діапазон швидкостей:	для VC - 1:1000, для SVC - 1:100.
Точність підтримки швидкості:	SVC: $\pm 0,5\%$ от максимального значення, VC: $\pm 0,1\%$ от максимального значення

					ЕТФ. КНУ.РБ.141.25.249-04	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

Крок регулювання за частотою: 0,01 Гц при цифровому керуванні
0,1% при аналоговому керуванні

Графік розгону/гальмування: Лінійний, за допомогою S-подібної кривої,

Поштовховий режим (режим КД): Частота поштовхів: 0,0 Гц ÷ MAX.

Час задатчика інтенсивності з поштовхами: 0÷3600,0 с

Вбудовані ПІД-регулятори швидкості та струму

Автоматична стабілізація напруги ланки постійного струму:

Інтерфейс керування: Кольоровий дисплей з архівуванням
попереджень та помилок, чорно-білий дисплей
на виносному пульті керування

Протоколи зв'язку: Can, Modbus, Profibus, Ethernet

Діапазон температур: -10° ~ +50°с

Висота над рівнем моря без зміни робочих характеристик – до 1000м

Вологість: 5% ~ 95%, гарантується відсутність конденсату

Ступінь захисту оболонки: IP 54

Датчик струму. Тому, що номінальний струм двигуну дорівнює 117 А, обираємо датчик струму типу CSLA, призначений для безконтактного вимірювання величини постійного або змінного струму у провіднику, який проходить крізь отвір корпусу датчика. Такий спосіб підключення забезпечує вихідну ізоляцію, легкий і зручний, а також зводить до мінімуму енергію, що розсіюється. Датчики CSLA невразливі від високої перехідної напруги і великих кидків струму. Чутливим елементом пристрою є датчик Холла.

Таблиця 1.4. Технічні характеристики датчика струму

Серія	<u>CSLA</u>
Виробник	HONEYWELL
Підключення до вимірювального кола	безконтактне
Тип виходу	лінійний
Максимально припустимий струм, А	150
Можливість вимірювання постійного струму, Іпост	так

Можливість вимірювання змінного струму, Ізм.	так
Можливість вимірювання імпульсного струму, Імп.	ні
Напруга живлення, В	8.0...16.0
Чутливість мінімальна, мВ/А·віток	19.6
Час спрацювання, мс	3
Температура робоча, °С	-25...85
Граничний вихідний струм, мА	10
Вага:	40 гр.

Датчик швидкості. Виходячи з величини максимальної швидкості двигуну обираємо в якості датчика швидкості енкодер WDG 40A з параметрами:

- Кількість імпульсів на один оборот: 1500;
- Гранична кількість обертів: 12000 об/хв.;
- Частота гранична: 200 кГц;
- Напруга робоча: 4,75 — 5,5 В DC;
- Температура робоча: -20 — +80°С.

1.5. Складання схеми заміщення, математичний опис і розрахунок механічних і енергетичних характеристик

Для аналізу режимів роботи АД зазвичай застосовують схему заміщення, яка наведена на рис. 1.12. Тут x_1 , r_1 — індуктивний опір розсіяння фази обмотки ротора та активний опір. Приведення до кіл ротору здійснюється таким чином:

$$r'_2 = r_2 k^2, \quad x'_2 = x_2 k^2,$$

де $k = E_1/E_{2k} = U_{1\phi}/E_{2k}$ — коефіцієнт трансформації двигуна за напругою.

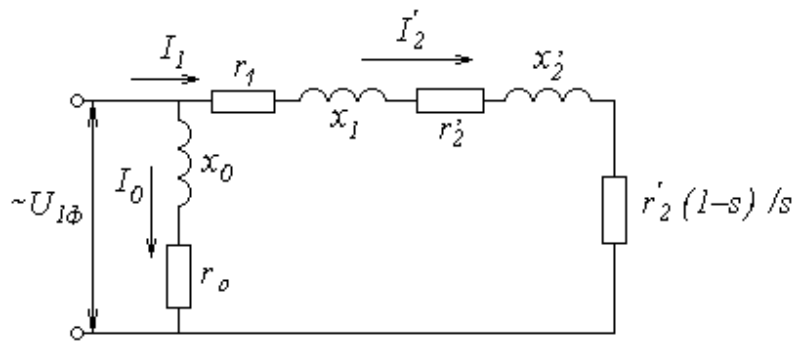


Рис. 1.12. Схема заміщення АД

При розрахунках приймаються наступні припущення: незмінність опорів схеми заміщення (при фіксованій частоті, в цьому випадку індуктивні опори X_1 , X_2 , X_0 розраховуються для номінальної частоти).

Коефіцієнт підсилення за напругою перетворювача частоти визначається так:

$$k_n = \frac{U_{ПЧ}}{U_K} = \frac{U_{ПЧНОМ}}{10} = \frac{660}{10} = 66$$

де $U_{ПЧНОМ}$ - номінальна вихідна напруга частотного перетворювача. Номінальну напругу керування U_K приймемо на рівні $U_K = 10$ В. Стала часу швидкодії частотного перетворювача приймемо на рівні $T_{II} = 0.001$ с.

Номінальний струм асинхронного двигуна розраховується таким чином:

$$I_H = \frac{P_{НОМ}}{3 \cdot U_{\phiНОМ} \cdot \cos\varphi_{НОМ} \cdot \eta_{НОМ}} = \frac{200000}{\sqrt{3} \cdot 11400 \cdot 0.92 \cdot 0.94} = 117 \text{ А}$$

Розрахунок ковзання номінального:

$$s_n = \frac{n_c - n_n}{n_c} = \frac{1500 - 1480}{1500} = 0.013$$

Звідси ковзання критичне буде::

$$s_{KP} = s_H \cdot \left(\lambda_M + \sqrt{\lambda_M^2 - 1} \right) = 0.013 \cdot \left(2 + \sqrt{2^2 - 1} \right) = 0.054$$

Повний опір короткого замикання АД розраховується так:

$$Z_K = \frac{U_{\phi}}{\lambda_I \cdot I_H} = \frac{660}{6 \cdot 117} = 0.937 \text{ Ом}$$

де U_ϕ – живляча напруга фази асинхронного двигуну; λ_I – коефіцієнт перевантажувальної здатності за струмом.

Інакше, повний опір короткого замикання АД розраховується таким чином:

$$Z_K = \sqrt{R_1^2 + R_2'^2 + X_K'^2},$$

де R_2' – наведений до боку статора активний опір роторної фази при пусковому ковзанні $s = 1$; R_1 – активний опір статорної фази АД; X_K' – індуктивний опір короткого замикання АД.

Тоді величина пускового моменту знаходиться таким чином:

$$M_{II} = \frac{3U_\phi^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot Z_K^2},$$

Використовуючи отриманий вираз пускового моменту, вирішимо його відносно опору роторної фази при ковзанні $s = 1$:

$$R_2' = \frac{M_{II} \cdot \omega_0 \cdot Z_K^2}{3U_\phi^2} = \frac{M_H \cdot \lambda_{II} \cdot \omega_0 \cdot Z_K^2}{3U_\phi^2} = \frac{1291 \cdot 1.3 \cdot 157 \cdot 0.937^2}{3 \cdot 660^2} = 0.177 \text{ Ом.}$$

де ω_0 - швидкість синхронна обертання магнітного поля статора АД.

Статорний фазний опір визначається за наступним виразом:

$$R_1 = \frac{U_{1HOM}^2 (1 - s_{HOM})}{2C_1 (P_{HOM} + P_{MEH}) \lambda_M \cdot \left[1 + \frac{C_1}{s_{KP}} \right]},$$

де U_{1HOM} – лінійна живляча напруга статору;

s_{HOM} – ковзання номінальне;

C_1 – коефіцієнт, враховуючий магнітні властивості АД;

P_{MEH} – величина потужності механічних втрат у асинхронному двигуні;

λ_M – величина коефіцієнту перевантажувальної здатності за моментом.

					ЕТФ. КНУ.РБ.141.25.249-04	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$R_1 = \frac{660^2 \cdot (-0.013)}{2 \cdot 1.03 \cdot (-0.00000 + 0.005 \cdot 200000) \cdot 2,2 \cdot \left[1 + \frac{1.03}{0.054}\right]} = 0.024 \text{ Ом.}$$

Звідси індуктивний опір короткого замикання АД X'_K :

$$X'_K = \sqrt{Z_K^2 - (R_1 + R'_2)^2} = \sqrt{0.937^2 - (-0.024 + 0.177)^2} = 0.915 \text{ Ом.}$$

Індуктивні опори статора та ротору X_1 та X'_2 знайдемо половини від X'_K , тобто:

$$X_1 = X'_2 = \frac{X'_K}{2} = \frac{0.915}{2} = 0.457 \text{ Ом.}$$

Опір намагнічування індуктивний розраховуємо наступним чином:

$$X_\mu = X_0 = \frac{U_{1НОМ}}{\sqrt{3} I_{\muНОМ}} = \frac{660}{\sqrt{3} \cdot 45.8} = 8.33 \text{ Ом,}$$

де

$$I_{\muНОМ} \approx I_{1НОМ} \cdot \sin \varphi_{НОМ} = 117 \cdot 0.39 = 45.8 \text{ А}$$

Розрахункові величини індуктивностей ротора й статора:

$$L_1 \approx L_2 = \frac{X_1}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{0.457}{314} = 0.0015 \text{ Гн}$$

Розрахункові значення індуктивностей розсіювання ротора і статора:

$$L_{1s} \approx L_{1r} = \frac{1}{4\pi f_{НОМ}} \cdot \sqrt{\left[\left(\frac{U_{НОМ} / \sqrt{3}}{i_K \cdot I_{НОМ}} \right)^2 - (R_1 + R'_2)^2 \right]},$$

$$L_{1s} \approx L_{1r} = \frac{1}{4\pi 50} \cdot \sqrt{\left[\left(\frac{1140 / \sqrt{3}}{6 \cdot 117} \right)^2 - (-0.07 + 0.177)^2 \right]} = 0.0014 \text{ Гн.}$$

Звідси маємо коефіцієнт взаємодукції:

$$L_{12} = L_1 - L_{1s} = 0.0025 - 0.0014 = 0.0011 \text{ Гн.}$$

Еквівалентна електромагнітна постійна часу АД:

					ЕТФ. КНУ.РБ.141.25.249-04	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$T_E = \frac{L_E}{R_E}$$

$$T_E = \frac{L_E}{R_E} = \frac{0,002}{0,093} = 0,022 \text{ с.}$$

де еквівалентний опір статорної фази:

$$R_E = R_1 + R'_2 \cdot \left(\frac{L_{12}^2}{L_2^2} \right) = 0,07 + 0,117 \cdot \left(\frac{0,0011^2}{0,0025^2} \right) = 0,093 \text{ Ом,}$$

еквівалентна індуктивність статорної обмотки:

$$L_E = L_1 - \left(\frac{L_{12}^2}{L_2} \right) = 0,0025 - \left(\frac{0,0011^2}{0,0025} \right) = 0,002 \text{ Гн.}$$

Для розрахунку статичних характеристик приймаються наступні позначення:

Абсолютне ковзання (відносна частота ротора) - це відношення падіння швидкості $\Delta\omega$ до синхронної швидкості (при умові номінальної частоти).

$$\beta = \frac{\Delta\omega}{\omega_{1н}} = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_{1н}} = \frac{f_2}{f_1}.$$

Параметр β приймається в якості ковзання s і має з ним наступний зв'язок:

$$s = \Delta\omega / \omega_1 = f_2 \cdot f_{1н} / f_1 \cdot f_{1н} = \beta / \alpha.$$

Напруга відносна на статорі:

$$\gamma = U_1 / U_n.$$

Коефіцієнт розсіювання магнітного потоку для статора й ротора:

$$\tau_1 = x_1 / x_0, \quad \tau_1 = 0,8 / 8,33 = 0,056;$$

$$\tau_2 = x'_2 / x_0, \quad \tau_2 = 0,8 / 8,33 = 0,056.$$

Загальний коефіцієнт розсіювання магнітного потоку:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_1 \cdot \tau_2. \quad \tau = 0,056 + 0,056 + 0,056 \cdot 0,056 = 0,115.$$

Уведемо також наступні розрахункові коефіцієнти:

$$b = R_1 \cdot (\tau_1 + \tau_2), \quad b = 0,07 \cdot (0,056 + 0,056) = 0,074;$$

					ЕТФ. КНУ.РБ.141.25.249-04	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

$$C = X_0 \cdot \tau,$$

$$C = 14.39 \cdot 0,115 = 1.65;$$

$$d = \frac{R_1}{X_0},$$

$$d = \frac{0,07}{14.39} = 0,0049;$$

$$e = 1 + \tau_1,$$

$$e = 1 + 0,056 = 1,056.$$

Розрахунки сталого режиму проводяться в іменованих величинах. Зі схеми заміщення ми можемо отримати струм статора, який визначається наступним чином:

$$\begin{aligned} I_{1\alpha} &= U_H \cdot \sqrt{\frac{R_2 / x_m^2 + (1 + \tau_2)^2 \cdot \beta^2}{(b^2 + c^2 \cdot \alpha^2) \cdot \beta^2 + 2 \cdot R_1 \cdot R_2' \cdot \alpha \cdot \beta + (d^2 + e^2 \cdot \alpha^2) \cdot R_2'^2}} = \\ &= U_H \cdot \gamma \cdot \sqrt{\frac{C(\beta)}{A(\alpha, \beta)}} \end{aligned} \quad (1.1)$$

Також наведений роторний струм:

$$\begin{aligned} I_{2\alpha} &= U_H \cdot \gamma \cdot \frac{\beta}{\sqrt{(b^2 + c^2 \cdot \alpha^2) \cdot \beta^2 + 2 \cdot R_1 \cdot R_2' \cdot \alpha \cdot \beta + (d^2 + e^2 \cdot \alpha^2) \cdot R_2'^2}} = \\ &= U_H \cdot \gamma \cdot \frac{\beta}{\sqrt{A(\alpha, \beta)}} \end{aligned} \quad (1.2)$$

Розрахунковий момент двигуна електромагнітний:

$$\begin{aligned} M_\alpha &= \frac{m_1 \cdot U_H^2}{\omega_1} \cdot \gamma^2 \cdot \frac{R_2' \cdot \beta}{(b^2 + c^2 \cdot \alpha^2) \cdot \beta^2 + 2 \cdot R_1 \cdot R_2' \cdot \alpha \cdot \beta + (d^2 + e^2 \cdot \alpha^2) \cdot R_2'^2} = \\ &= \frac{m_1 \cdot U_H^2}{\omega_{1H}} \cdot \gamma^2 \cdot \frac{R_2' \cdot \beta}{A(\alpha, \beta)} \end{aligned} \quad (1.3)$$

В виразах (1.1)–(1.3) деякі позначення розшифровуються наступним чином:

$$A(\alpha, \beta) = (b^2 + c^2 \cdot \alpha^2) \cdot \beta^2 + 2 \cdot R_1 \cdot R_2' \cdot \alpha \cdot \beta + (d^2 + e^2 \cdot \alpha^2) \cdot R_2'^2,$$

$$B(\beta) = R_2' + X_2' \cdot \beta^2,$$

$$C(\beta) = \frac{R_2'^2}{X_0^2 + (1 + \tau_2) \cdot \beta^2},$$

$$D\beta = \frac{R_2^2}{X_0^2 + \tau_2^2 \cdot \beta^2},$$

конструктивний коефіцієнт обмотки фази статора

$$C_1 = 4,44 \cdot \omega_1 \cdot K_\omega,$$

$$\omega = \omega_{1н} \cdot (\alpha - \beta),$$

де m_1 – кількість фаз статора.

Нижче розраховані графіки, побудовані за вищенаведеними формулами струму статора, електромагнітного моменту, струму ротора, наведеного до статора й струму намагнічування. Тут використовується закон скалярного керування при використанні закону $U/\sqrt{f} = const$, та застосовуються відносні частотах $\alpha = 0.45, 0.65, 0.85, 1$.

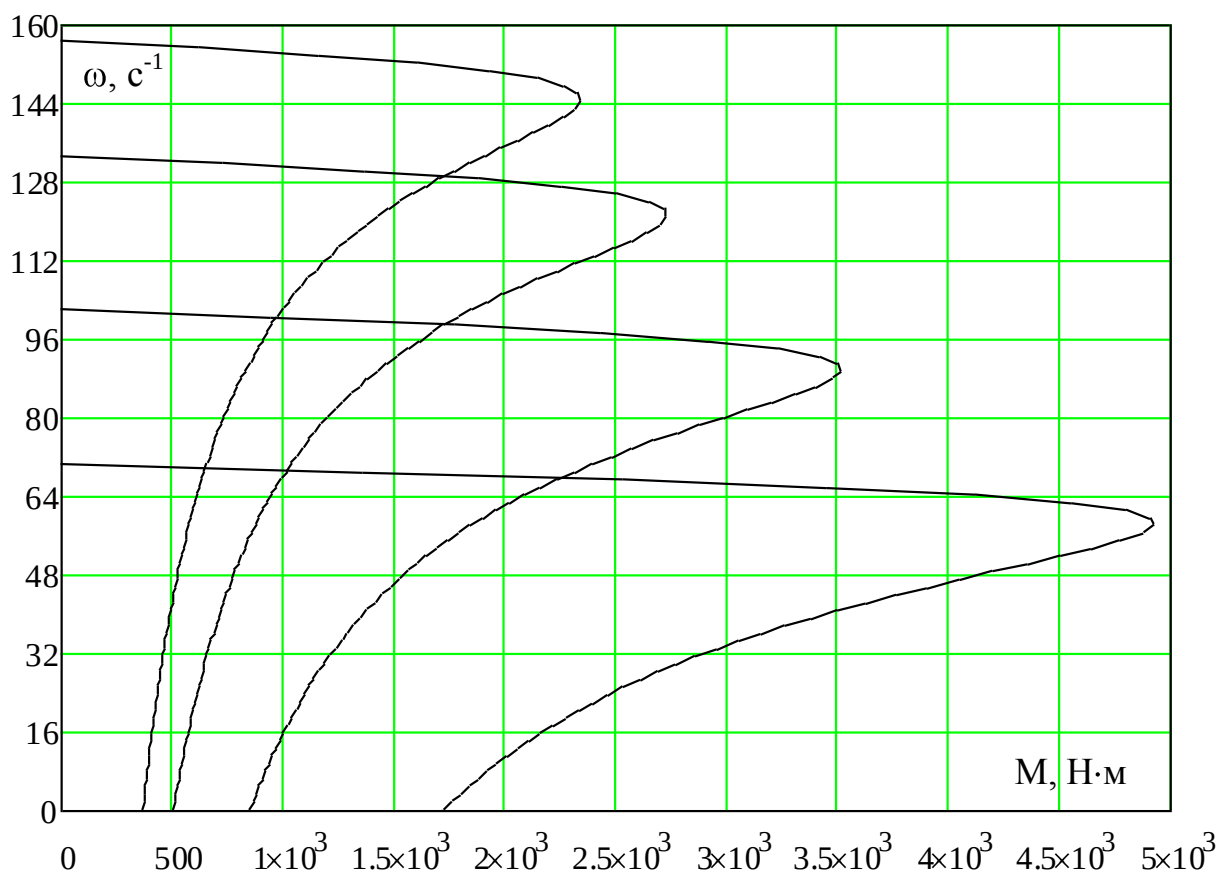


Рис. 1.10. Механічні характеристики АД при використанні закону керування

$U/\sqrt{f} = const$ й відносних частотах $\alpha = 0.45, 0.65, 0.85, 1$.

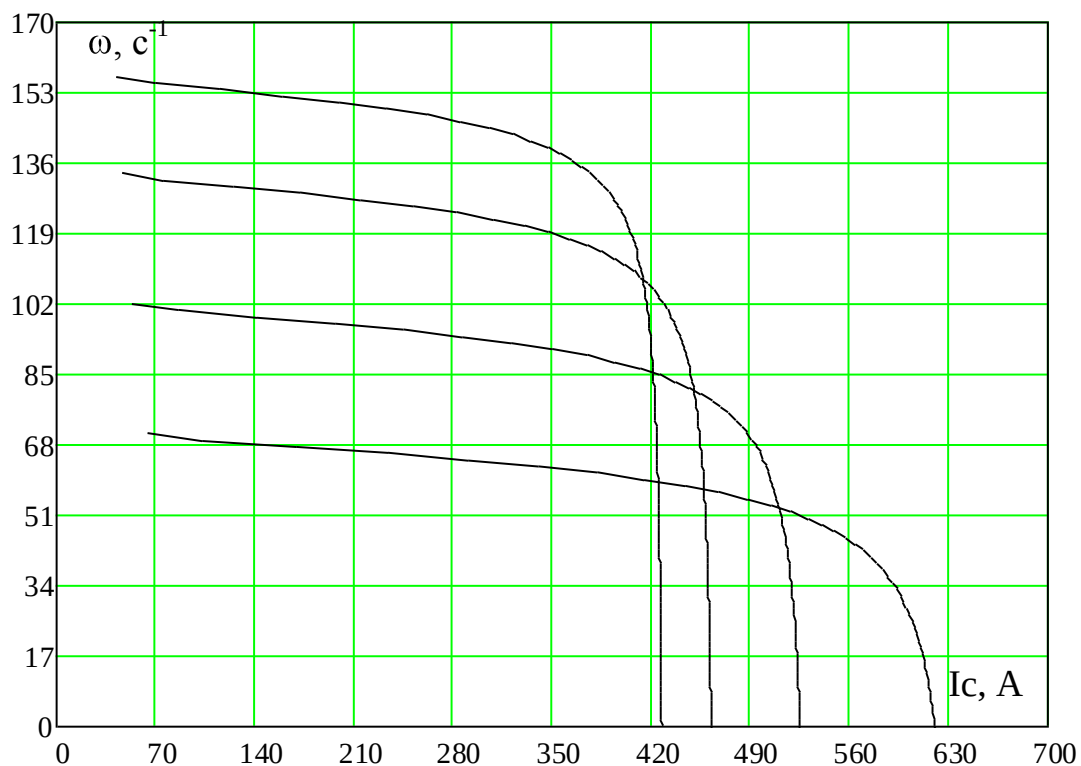
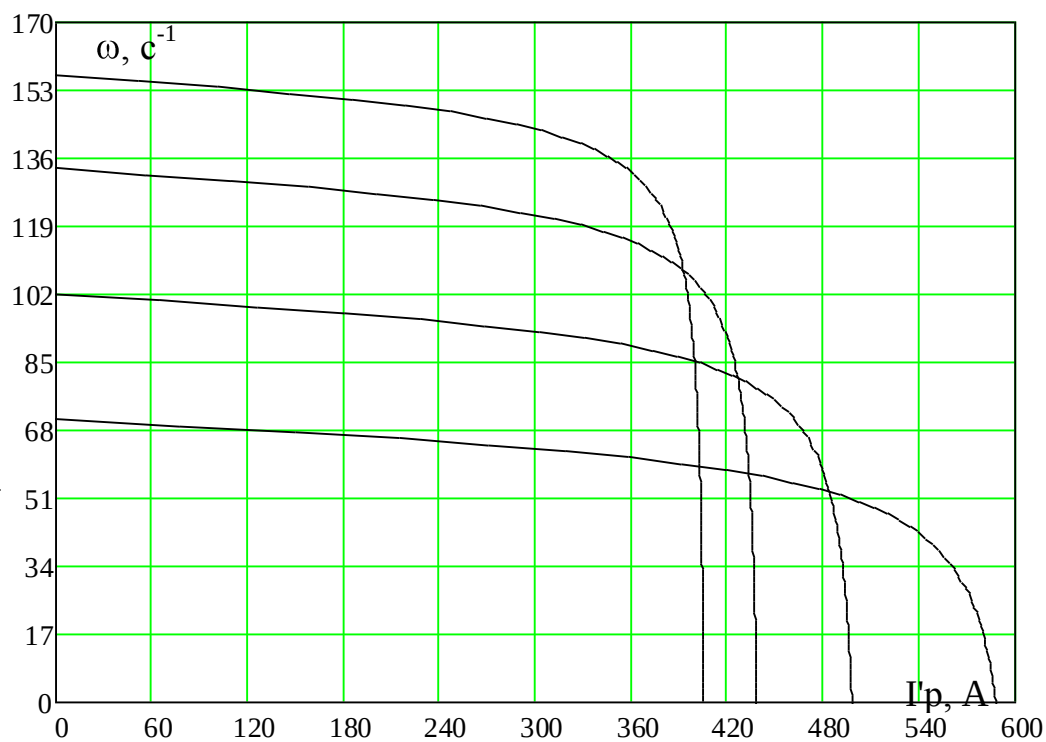


Рис. 1.11. Графіки струму статора АД при використанні закону керування

$U/\sqrt{f} = const$ і відносних частотах $\alpha = 0.45, 0.65, 0.85, 1$.



Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЕТФ. КНУ.РБ.141.25.249-04

Арк.

41

Рис. 1.12. Графіки наведеного роторного струму АД при використанні закону керування $U/\sqrt{f} = \text{const}$ і відносних частотах $\alpha = 0.45, 0.65, 0.85, 1$

Аналіз енергетичної ефективності системи ПЧ-АД оцінюють за допомогою коефіцієнта корисної дії η . Він дорівнює добутку коефіцієнта корисної дії ПЧ $\eta_{пч}$ та АД $\eta_{ав}$:

При частотному керуванні механічний ККД розраховується за формулою:

$$\eta = 1 - \frac{p'_H \cdot \tau^2 + \sigma_2 \phi^2 + a_{\alpha,0} \cdot \tau_\mu^2 + a_I \cdot \alpha^{1,25}}{\mu \omega / \omega_n + p'_H \cdot \tau^2 + \sigma_1 \phi^2 + a_{\alpha,0} \cdot \tau_\mu^2} \quad (1.4)$$

де $p'_H = \frac{\Delta P_H}{M_H \cdot \omega_H}$ - повні втрати (в долях від потужності АД);

$p_2 = a_{\alpha 1} + a'_{\alpha 2}$ - коефіцієнт змінних втрат, який враховує додаткові втрати, ця величина відрізняється від ρ_1 величиною $a'_{\alpha 2} \approx 0,33$;

$\tau = \frac{I'_{2a}}{I'_{2H}}$ - відносна величина наведеного до статора струму ротора;

$\sigma_2 = a'_{C,Г} \cdot \alpha + a'_{C,В} \cdot \alpha^2$ - коефіцієнт магнітних втрат, він враховує всі втрати в сталі, як основні, так і додаткові;

$\phi = \frac{\Phi_\alpha}{\Phi_H}$ - відносна величина потоку двигуна;

$a_{\alpha,0} \approx 0,02 \div 0,06$ - коефіцієнт втрат у обмотках статора, пов'язаний з величинами робочого струму та струму намагнічення;

$\tau_\mu = \frac{I_{\mu\alpha}}{I_{\mu H}}$ - відносна величина струму намагнічення;

$a_M = \Delta P_{M,Н} / \Delta P_H = 0,09 \div 0,06$ - коефіцієнт втрат в механічній частині приводу;

$\mu = \frac{M_\alpha}{M_H}$ - відносна величина електромагнітного моменту;

					ЕТФ. КНУ.РБ.141.25.249-04	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$\rho_1 = a_{\varepsilon 1} + a_{\varepsilon 2}$ – коефіцієнт втрат у обмотках ротора й статора, які залежать від струму;

$$I_{2\alpha}; a_{\varepsilon 1} \approx 0,28 \div 0,32;$$

$\sigma_{1\alpha} = a_{C.G} \cdot \alpha + a_{C.B} \cdot \alpha^2$ – показник втрат у статорі, який залежить від вихрових струмів й гістерезису;

$a_{C.G} + a_{C.B} \approx 0,28 \div 0,32$ (величина $\alpha_{C.G}/\alpha_{C.B}$ в залежності від марки сталі і товщини листів дорівнює $0,12 \div 0,6$ (менше значення - листи товщиною 0,35 мм з високо легованої сталі, більше значення - листи товщиною 0,5 мм. зі слабо легованої сталі)).

Тут прийняті коефіцієнти $a_{E.O} = 0.04$; $a_{C.B} = 0.046$; $a_{C.G} = 0.154$; $a_M = 0.075$; $a'_{C.G} = a_{C.G} \cdot 1.01$; $a'_{C.B} = a_{C.B} \cdot 1.01$; $a_{\varepsilon 1} = 0$.

Тоді за допомогою формули механічного ККД побудуємо графіки залежності ККД від ковзання β при різних відносних частотах $\alpha = 1, 0.75, 0.5, 0.25$ (рис. 1.13.)

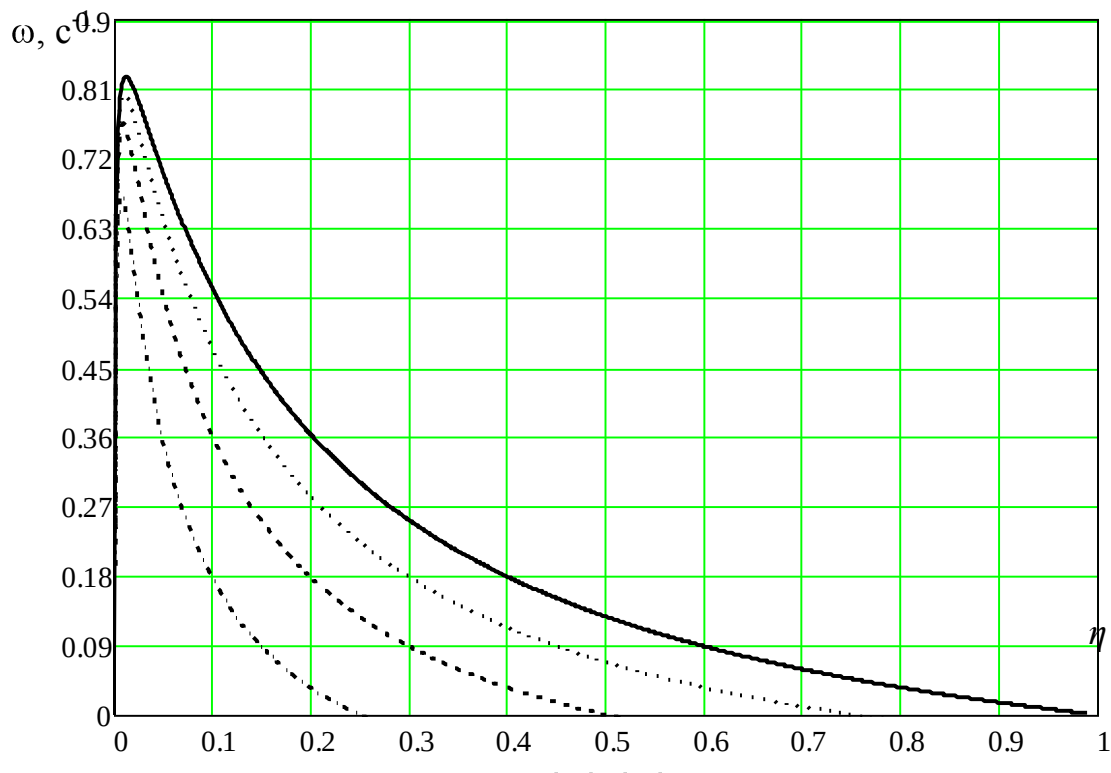


Рис. 1.13. Залежність механічного коефіцієнта корисної дії асинхронного двигуна від β при використанні закону керування $U/\sqrt{f} = const$ і частотах $\alpha = 1, 0.75, 0.5, 0.25$

Коефіцієнт потужності при роботі системи ПЧ-АД обчислюється по формулі:

$$\cos \varphi \approx \frac{R_1 \cdot \left(\frac{r_2'^2}{x_0^2} + \left(1 + \tau_2 \right)^2 \beta^2 \right) + \alpha \cdot R_2' \cdot \beta}{\sqrt{\left(\frac{r_2'^2}{x_0^2} + \left(1 + \tau_2 \right)^2 \beta^2 \right)^2 + 2 R_1 R_2' \cdot \alpha \cdot \beta + \left(\frac{r_2'^2}{x_0^2} + \left(1 + \tau_2 \right)^2 \beta^2 \right) \cdot R_2'^2 \cdot \sqrt{\frac{r_2'^2}{x_0^2} + \left(1 + \tau_2 \right)^2 \beta^2}}} \quad (1.5)$$

За допомогою попередньої формули отримаємо графіки коефіцієнта потужності в залежності від швидкості (при різних відносних частотах), наведені на рис. 1.14. На рис. 1.15. наведений графік коефіцієнта потужності від частоти α при фіксованому номінальному ковзанні $\beta = 0.02$.

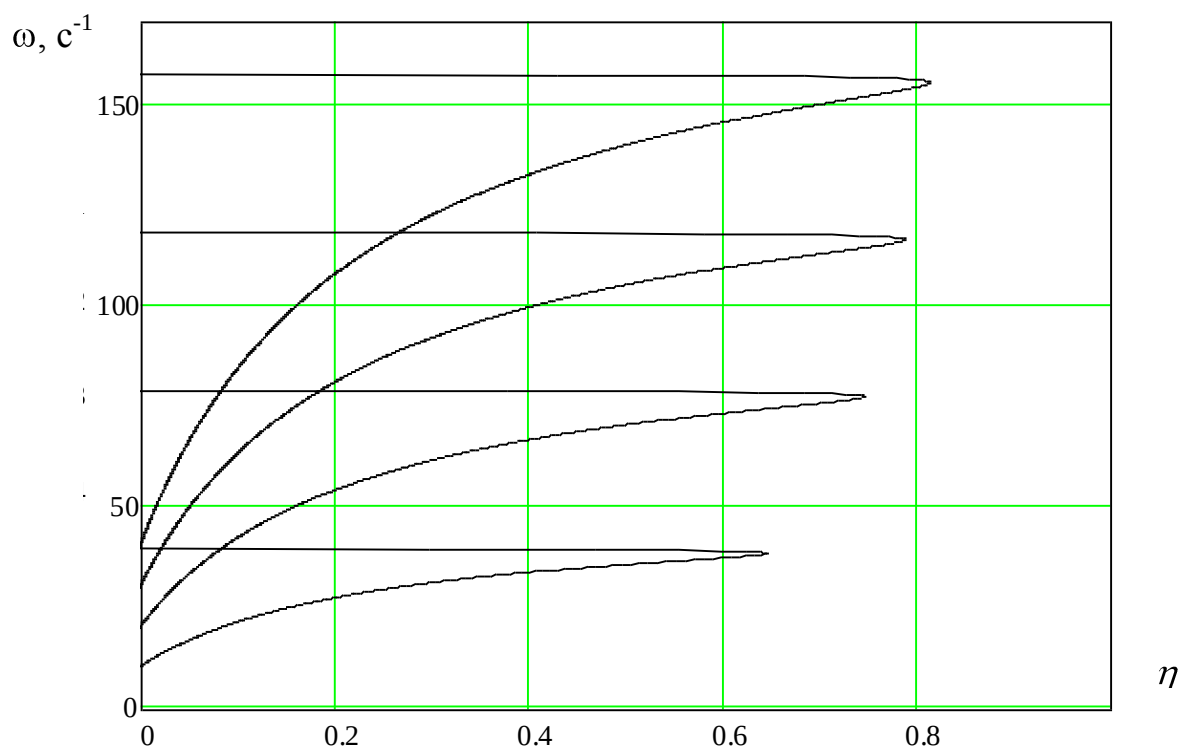


Рис. 1.14. Графік ККД в залежності від швидкості асинхронного двигуна при законі використанні закону керування ПЧ $U/\sqrt{f} = const$ і частотах $\alpha = 1, 0.75, 0.5, 0.25$

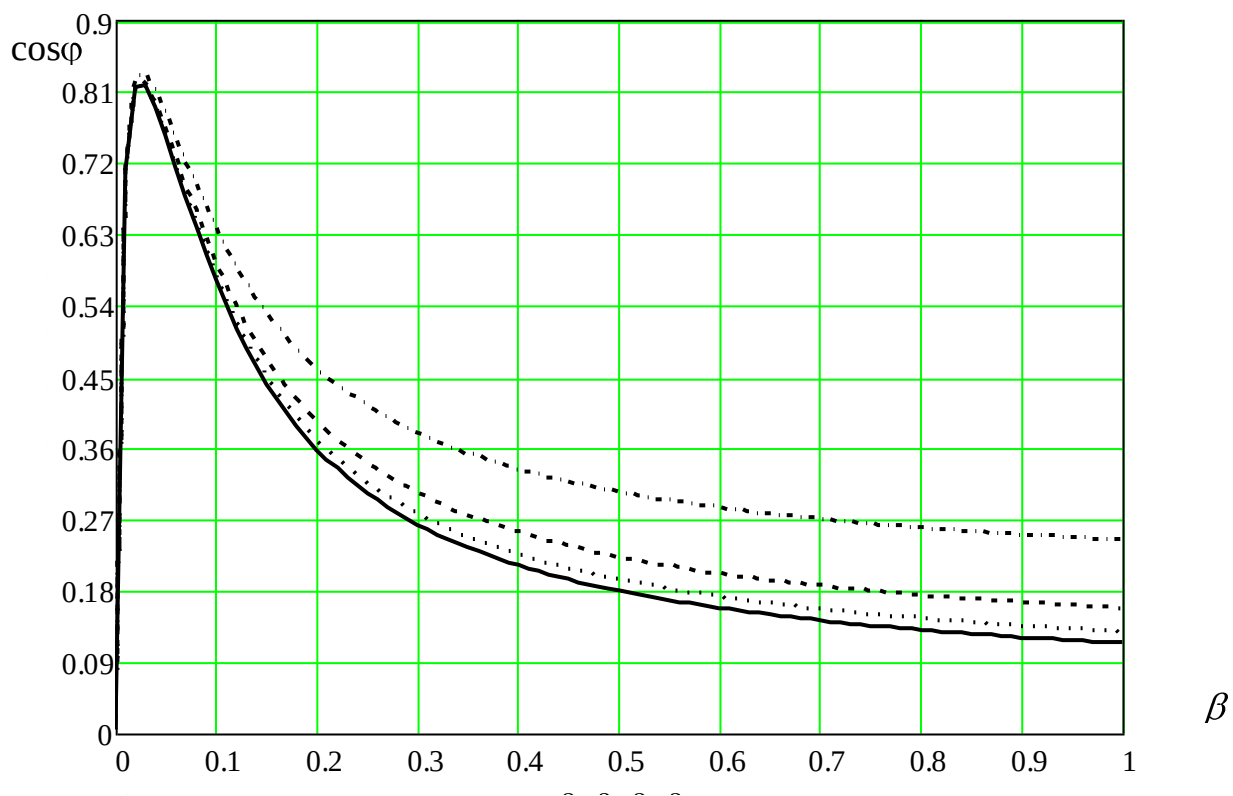


Рис. 1.15. Графік коефіцієнта потужності АД в залежності від ковзання β при фіксованих частотах $\alpha = 1, 0.75, 0.5, 0.25$

РОЗДІЛ 2. Обґрунтування і розробка системи керування електроприводом

2.1. Обґрунтування і вибір структури системи керування електроприводом

Найбільше розповсюдження в наш час для асинхронних електричних приводів мають СЕП ПЧ-АД з векторним керуванням, з датчиками, та без датчиків. Такі системи приводу мають жорсткі механічні характеристики та значну швидкодію. Але це неможливо без складних систем керування, що вимагає висококваліфікаційного обслуговуючого персоналу, приводить до зниження надійності роботи комбайна, котрий, як відомо, постійно працює при постійних значних ударах та вібраціях.

Треба усвідомити, що такі високоточні системи електроприводу взагалі не потрібні для приводу коронок комбайнів. Для головного приводу комбайнів актуально необхідна можливість регулювання швидкості обертання коронки у деяких межах, для вибору раціонального режиму різання породи різної твердості. Треба мати на увазі, що для підвищення універсальності роботи комбайна на деяких моделях встановлюють двохшвидкісний асинхронний двигун, що підтверджує необхідність регулювання швидкості коронки. Векторне керування потребує використання датчиків, наприклад тахогенератора, який необхідно з'єднати з валом. Якщо ж використати систему скалярного керування ПЧ-АД, то тут немає необхідності в датчиках, система автоматизованого електроприводу, яка використовує закони Костенко, є досить простою в побудуванні та налагодженні. Проведемо більш детальний огляд систем скалярного керування.

Схема заміщення для реалізації законів скалярного керування на АД надана на рис. 2.1.

					ЕТФ. КНУ.РБ.141.25.249-04			
Змн.	Арк.	№ документа.	Підпис	Дат	РОЗДІЛ 2. Обґрунтування і розробка системи керування електроприводом.	Літ.	Аркуш	Аркушів
Розробив.	Губар Б.В.						46	10
Перевірів.	Сьомочкин А.Б.					КНУ Каф.ЕІ ЕЕМ-21-2		
Рецензія.								
Н. Контр.								
Затверд..	Сінчук О.М.							

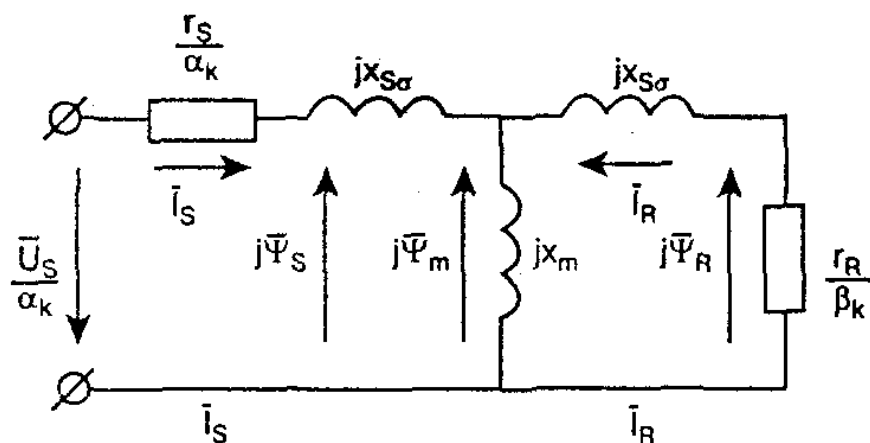


Рис. 2.1. Схема заміщення асинхронного двигуну у сталому режимі

За допомогою вказаної схеми заміщення можна здійснити цілий перелік скалярних законів керування АД:

1. $\frac{\bar{U}_s}{\alpha_k} = \text{const};$
2. $\bar{\Psi}_m = \text{const};$
3. $\bar{\Psi}_s = \text{const};$
4. $\bar{\Psi}_R = \text{const}.$

Більш детально наведені вираження моменту для вищенаведених законів керування:

$$\begin{aligned}
 1. \quad m &= \frac{\left(\frac{\bar{U}_s}{\alpha_k}\right)^2 \frac{r_R}{\alpha_k \beta_k}}{(x_{S\sigma} + x_{R\sigma})^2 + \left(\frac{r_s}{\alpha_k} + \frac{r_R}{\beta_k}\right)^2}; & 2. \quad m &= \frac{\bar{\Psi}_m^2 \frac{r_R}{\alpha_k \beta_k}}{(x_{R\sigma})^2 + \left(\frac{r_R}{\beta_k}\right)^2}; \\
 3. \quad m &= \frac{\bar{\Psi}_s^2 \frac{r_R}{\alpha_k \beta_k}}{(x_{S\sigma} + x_{R\sigma})^2 + \left(\frac{r_R}{\beta_k}\right)^2}; & 4. \quad m &= \frac{\bar{\Psi}_R^2 \frac{r_R}{\alpha_k \beta_k}}{\left(\frac{r_R}{\beta_k}\right)^2};
 \end{aligned}$$

Відомо, що вище зазначені закони скалярного керування широко застосовані й мають позитивний досвід використання во всіх галузях, де не вимагається високої швидкодії, та немає різких поштовхів моменту.

Вибір того чи іншого скалярного закону визначається умовою необхідності підтримки на визначеному рівні перевантажувальної спроможності:

$$\lambda = \frac{M_{\max}}{M_H} = \text{const},$$

де $M_{\max}$ — величина критичного моменту АД, M_H - величина номінального моменту навантаження.

Якщо характер зміни моменту навантаження визначений, то можна сформулювати необхідну величину співвідношення напруги й частоти на виході перетворювача частоти. З відомих трьох стандартних навантажень на валу, що наведені нижче:

$$\begin{aligned} M_H &= \text{const}, \left(\frac{U_s}{f_K} \approx \text{const} \right); \\ P_H &= M_H \omega_m = \text{const}, \left(\frac{U_s}{\sqrt{f_K}} \approx \text{const} \right); \\ M_H &= k \omega_m^2, \left(\frac{U_s}{f_K^2} \approx \text{const} \right). \end{aligned} \quad (2.1)$$

витікає, що для головного механізму комбайну найбільш раціонально застосувати другий за рахунком вид навантаження. З законів сухого тертя відомо, що в більшості випадків величина сили тертя покою помітно більше, ніж сила тертя руху. З трьох наведених нижче механічних характеристик АД для нашого випадку найбільш застосована характеристика рис. 2.2 б).

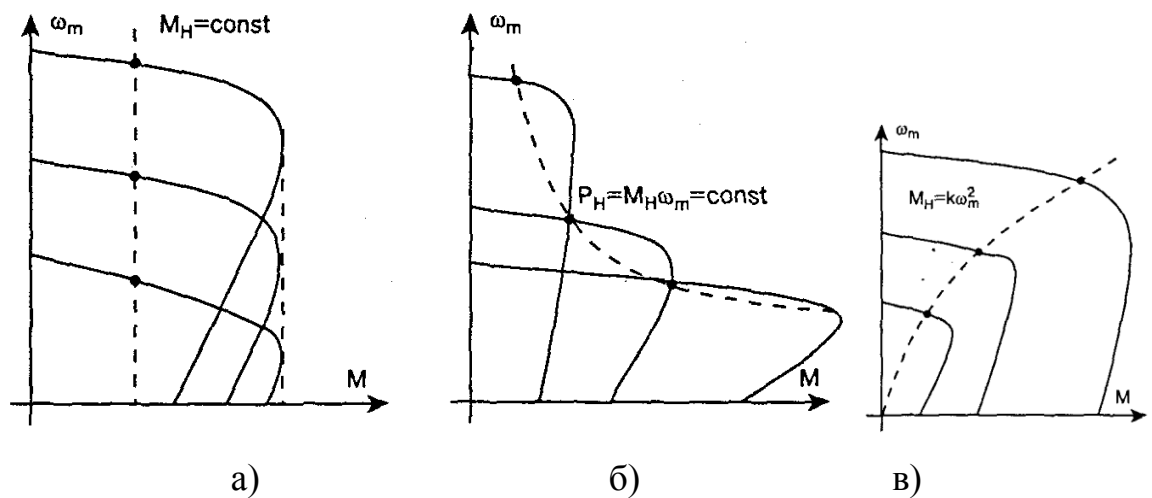


Рис. 2.2. Варіанти механічних характеристик асинхронних електроприводів при скалярному керуванні

Структурна схема електропривода, що здатна реалізувати вищенаведені закони, наведена на рис. 2.3. Самий головний вузол системи скалярного керування - ФП (функціональний перетворювач), він формує будь яку із скалярних залежностей (2.1). НП тут - напівпровідниковий перетворювач, який містить в собі випрямляч, ланку постійного струму, а також автономний інвертор з системою керування транзисторами, ЗІ - задатчик інтенсивності, призначений для формування зростаючого вхідного сигналу. В такому випадку, при використанні системи скалярного керування, пуск АД не буде супроводжуватися з різкими коливаннями струму й моменту, що властиво при прямому пуску АД.

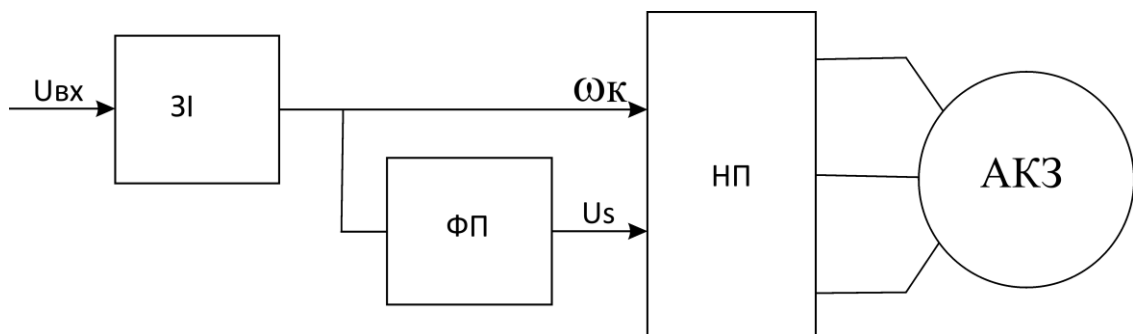


Рис. 2.3. Функціональна схема розімкнутої системи ЕП зі скалярним керуванням

2.2. Розрахунок параметрів елементів системи керування електроприводом

Номінальна вхідна, й вихідна частота інвертору складає 50 Гц, а вихідна номінальна напруга на номінальній частоті дорівнює 1140 В. Виберемо первинним вхідним сигналом вихідну напругу інвертора, від якої ми вже будемо обраховувати потрібну частоту інвертора, згідно обраному закону скалярного керування. Але через те, що вихідна напруга інвертора являє собою ШІМ-модульований сигнал, то за допомогою фільтрування дуже

непросто визначити адекватну амплітуду напруги. Тому в якості показника контролю амплітуди ШІМ - напруги інвертору оберемо такий параметр як індекс модуляції. Індекс модуляції однозначно відповідає амплітуді. Відомо, що ШІМ-напруга, щоб забезпечити першу гармоніку належної амплітуди та частоти, повинна змінювати шпаруватість в межах від 0 (мінімальна напруга) до 1 (максимальна напруга). Тому максимальна величина індекса модуляції – це мінімальна шпаруватість, яку в даний момент забезпечує система керування ПЧ. В подальшому, щоб спростити реалізацію закону скалярного керування, приведемо частоту ПЧ до відносних одиниць:

$$\frac{f_{НОМ}}{f_{БАЗ}} = \frac{50}{50} = 1$$

Величину вихідної напруги інвертору, через індекс модуляції, також приведемо до відносних одиниць:

$$\min dex = \frac{U_{НОМ}}{U_{БАЗ}} = \frac{1140}{1140} = 1,$$

тут $\min dex$ - *modulation index* – індекс модуляції.

Тоді потрібний закон скалярного керування, якщо вхідна частота є вхідним сигналом, формується наступним чином (враховуючи, що задатчик інтенсивності плавно змінює частоту):

$$\frac{U_s}{\sqrt{f_K}} \approx const \Rightarrow \frac{\gamma_{UH}}{\sqrt{f_{KH}}} = \frac{1}{\sqrt{1}} = 1 \Rightarrow \gamma_U = \sqrt{f_K},$$

де U_s - напруга на вході ПЧ, f_K - керована частота, f_{KH} - номінальна частота керування; γ_{UH} - номінальний індекс модуляції, γ_U - поточний індекс модуляції.

2.3. Розробка алгоритмів та програмного забезпечення мікропроцесорної системи керування електроприводом

					ЕТФ. КНУ.РБ.141.25.249-04	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Функціональну схему ПЧ (на рис.2.4) складається з двох частини: силовий канал і канал управління.

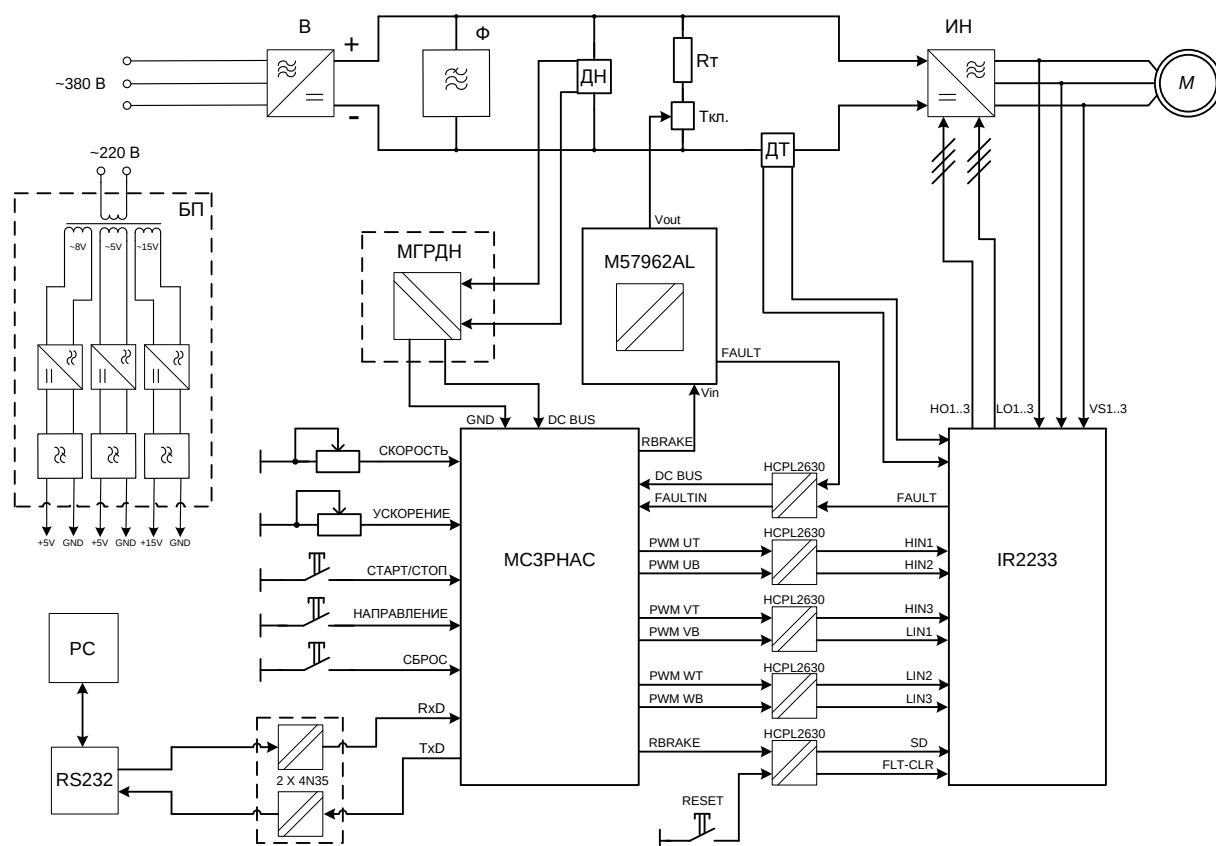


Рисунок 2.4 Функціональна схема перетворювача частоти

Силовий частина містить в собі наступних функціональних вузли: фільтр, випрямляч; гальмівний ключ; інвертор; датчик струму; датчик напруги.

Вхідна трифазна напруга за допомогою випрямляча перетворюється в постійну напругу. Далі постійна пульсуюча напруга йде на ємнісний фільтр, згладжує напругу. Фільтр також знижує перешкоди, що надходять з мережі. Далі після фільтрації напруга йде на транзисторний інвертор. Остаточо навантаженням інвертора слугує асинхронний двигун.

Трифазний інвертор складається з шести зворотних діодів та шести IGBT-транзисторів. Він генерує трифазної вихідну напругу за допомогою широтно-імпульсної модуляції. Вихідні частота і напруга окремо легко керуються за допомогою мікроконтролера. Найбільш застосований закон

скалярного регулювання $U / f = \text{constant}$ дозволяє отримувати регульовану напругу від 0 до 1140 V в діапазоні частот від 1 до 120 Гц.

Система керування може працювати як в автономному режимі, так і при використанні оболонки PC Master. При використанні PC Master керування йде по сигналам послідовного інтерфейсу RS-232, через COM-порт. В свою чергу мікроконтролер відправляє імпульси управління на драйвери силових ключів інвертору.

У ланцюзі ланки постійного струму застосований датчик напруги. Сигнал з нього надходить, через гальванічну розв'язку, на керуючий контролер. Також в силовому ланцюзі перед інвертором (в ланці постійного струму) включений датчик струму. Сигнал з нього надходить на окремі виводи драйверів керування транзисторами інвертора. Даний сигнал, формуючи сигнал аварії, також здійснює швидкодіюче відключення при перевантаженнях по струму.

В ланці постійного струму також встановлений гальмівний ключ, який гасить реактивну енергію гальмування АД, на гальмівному резисторі.

Система управління ПЧ складається з наступних модулів: мікроконтролера; інтерфейсу RS-232; цифрової і аналогової гальванічних розв'язок; драйверів керування транзисторами інвертора; драйверу керування гальмівним ключом; частотоміра цифрового; джерела живлення.

Згідно закладеної програм, в залежності від сигналів завдання, мікроконтролер формує системні сигнали для керування шістьма IGBT-транзисторами інвертора та гальмівним ключем. Сигнали керування інвертором ізольовані гальванічною розв'язкою і надходять на входи драйверів IGBT-транзисторів. Драйвер IGBT-транзисторів призначений для перетворення логічних сигналів в напругу, необхідну для безпечного відмикання і замикання IGBT-транзисторів. Драйвер керування гальмівним ключем містить вбудовану гальванічну розв'язку, через це зовнішня розв'язка не потрібна.

					ЕТФ. КНУ.РБ.141.25.249-04	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

Для візуалізації вихідної частоти застосовується цифровий частотомір, який підключається до одного з виходів інвертору.

Джерело живлення забезпечує створення живлення ряду напруг для активних компонентів системи.

Далі на рис. 2.5-2.7 наведені принципові схеми ПЧ, побудованого на мікросхемі MC3PHAC, а в Додатках наведені перелік елементів до вказаних схем

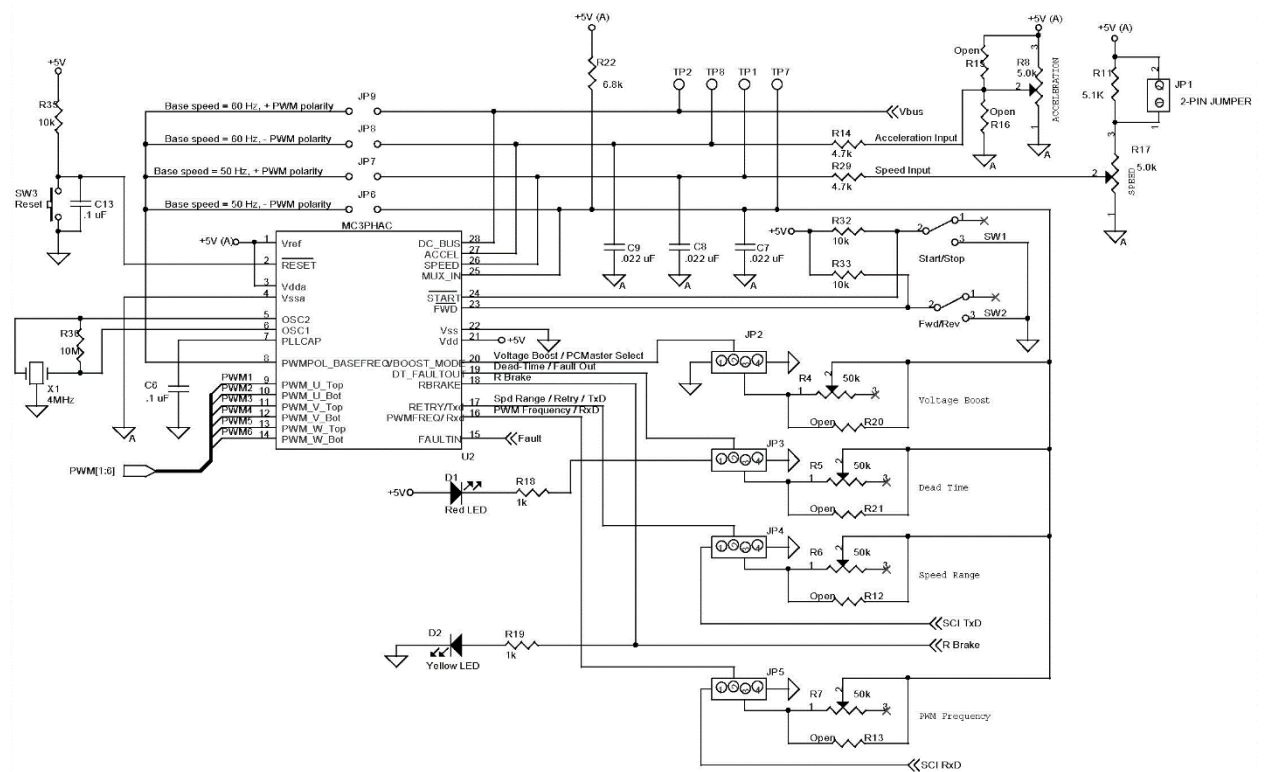


Рис.2.5. Основна схема плати управління ПЧ

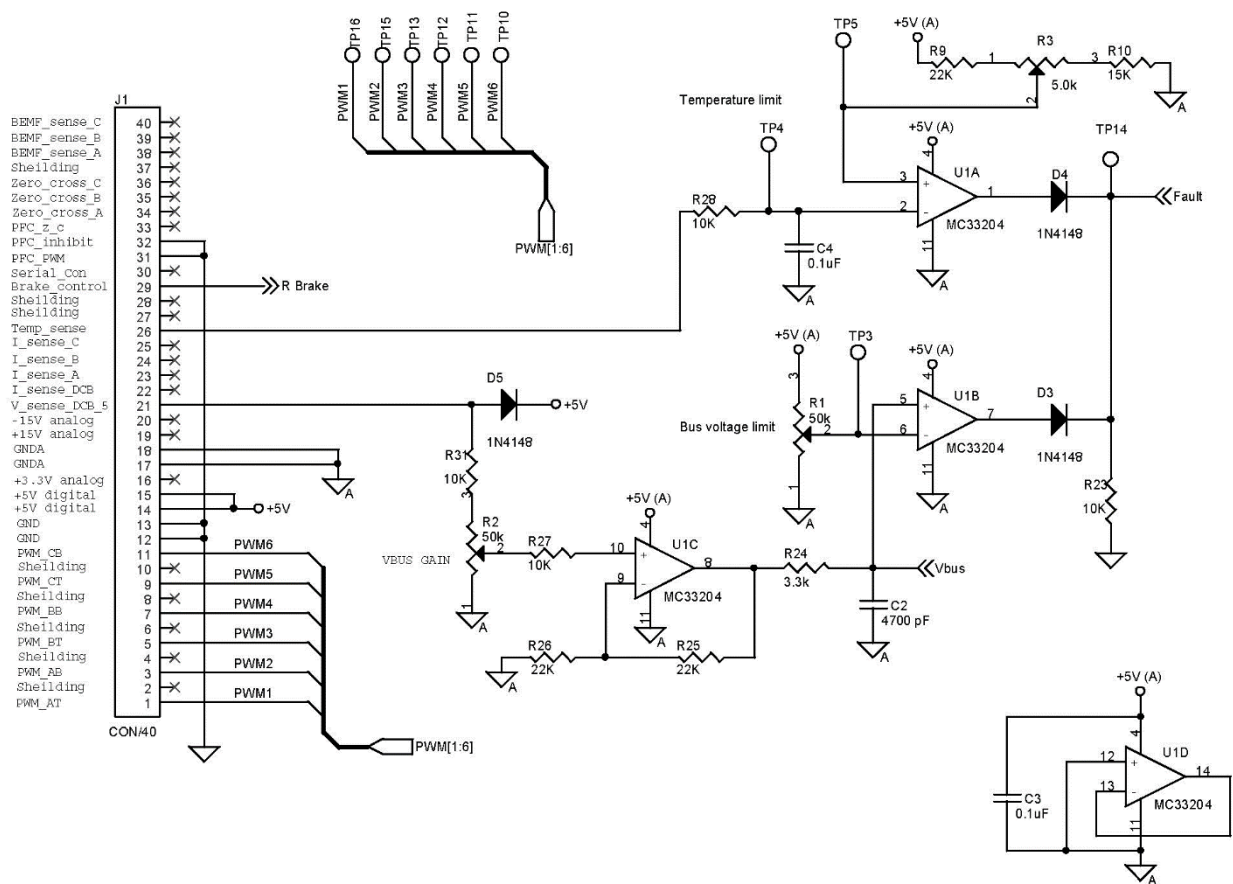


Рис. 2.6. Схема набору зворотних зв'язків ПЧ

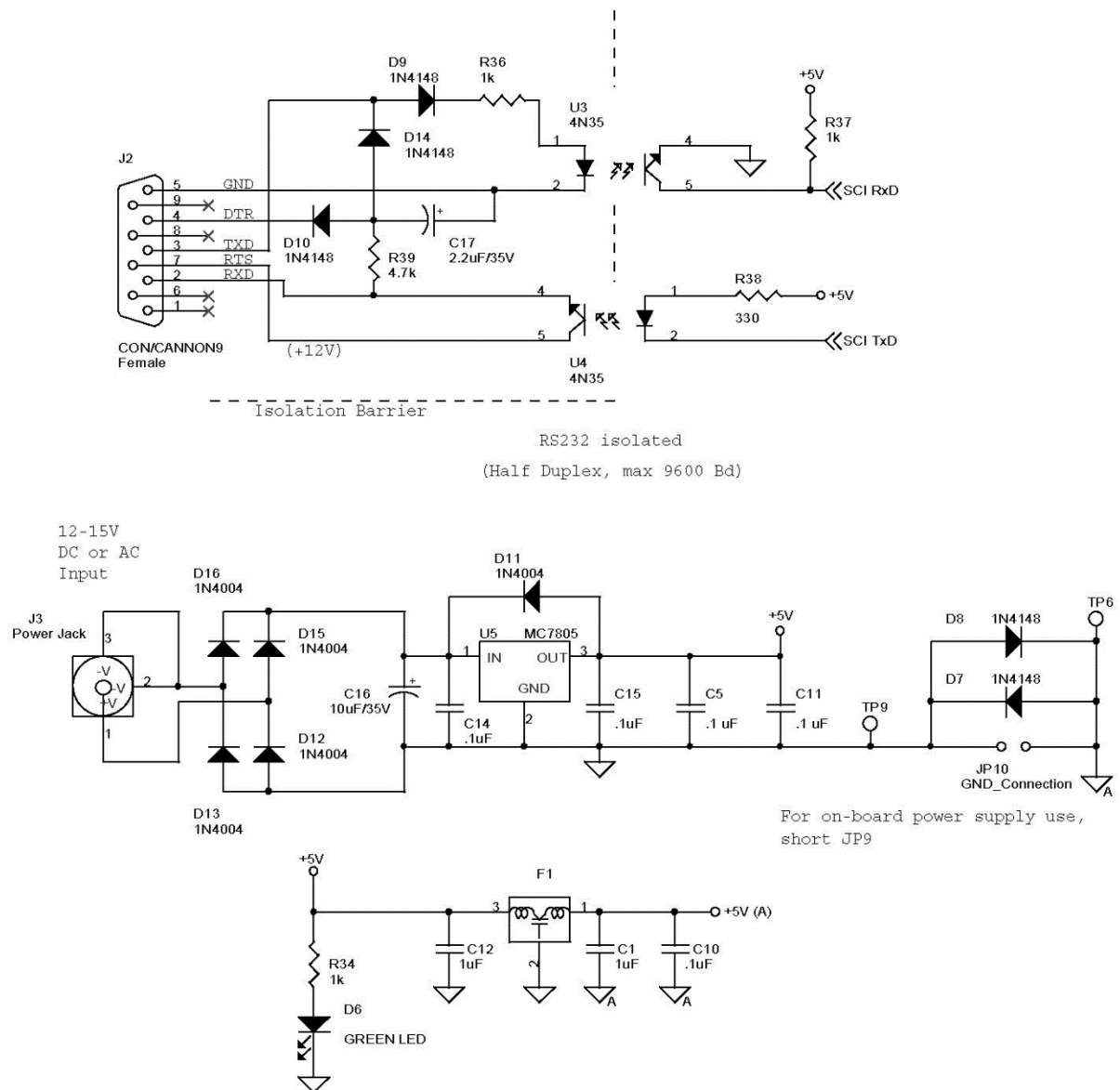


Рис. 2.7. Схема формування протоколу зв'язку RS232 та живлення ПЧ

Для розробленої схеми МП-системи керування інвертором у додатку А наведені специфікації.

РОЗДІЛ 3. Моделювання динамічних режимів роботи привода механізму на ЕОМ

3.1. Моделювання статичних та динамічних режимів замкненої системи в пуско-гальмівних режимах та при навантаженні

Для перевірки адекватності розрахованих раніше параметрів схеми заміщення АД з бібліотеки Матлабу був узятий довільний двигун и у ньому були налаштовані усі розрахункові параметри схеми заміщення АД - опори обмоток, їх індуктивності.

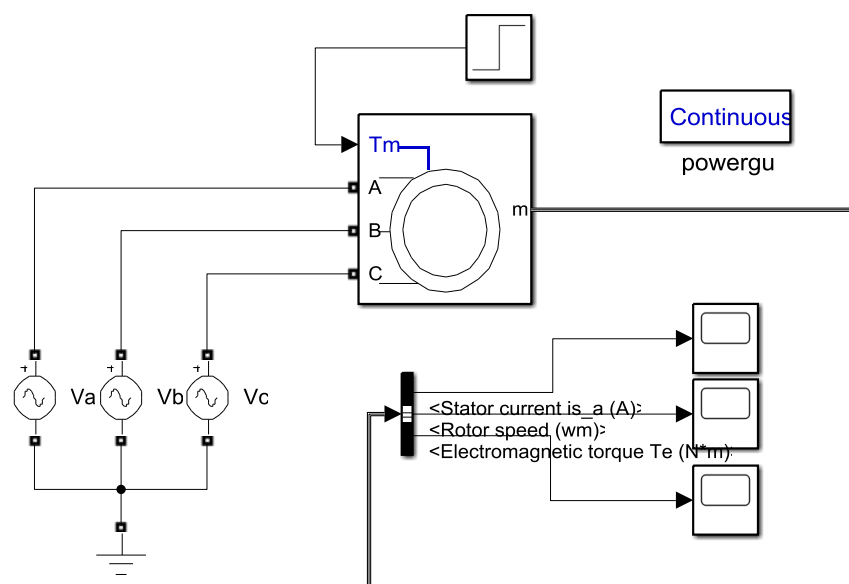


Рис. 3.1. Структура моделі Матлаб для перевірки адекватності параметрів схеми заміщення АД

В результаті здійснення досліджень на моделі можна констатувати, що параметри визначені практично правильно, тому що, як можна побачити на рис.3.4: критичний момент дійсно дорівнює величини приблизно $M_n \cdot K_m = 1270 \cdot 2,2 \approx 2800$ Нм, а наведене на рис.3.2 діюче значення сталого струму АД

					ЕТФ. КНУ.РБ.141.25.249-04				
Змн.	Арк.	№ документа.	Підпис	Дат	РОЗДІЛ 3. Моделювання динамічних режимів роботи привода механізму на ЕОМ.	Літ.	Аркуш	Аркушів	
Розробив.	ГубарБ.В.								
Перевірів.	Сьомочкин А.Б.						56	11	
Рецензія.						КНУ Каф. ЕІ ЕЕМ-21-2			
Н. Контр.									
Затверд..	Сінчук О.М.								

дорівнює величині ≈ 150 А, що трохи більше 117 А (різниця $\approx 30\%$) номінального розрахункового струму, й там же кратність за пусковим струмом дорівнює приблизно $1300/210 \approx 6$ в.о. Враховуючи, що в параметрах схеми заміщення в серії двигунів мається значний розкид, а також маються значні складності при спробах отримання адекватних параметрів схеми заміщення, можна прийняти, що були отримані досить адекватні результати розрахунків, які дозволяють моделювати динаміку АД з достатньої для наших цілей точністю. Падіння швидкості під номінальним навантаженням (рис. 3.3) досягає 2.7 с^{-1} , звідси ковзання дорівнює 0.017, що добре співпадає з розрахунковим значенням ковзання 0.013 (різниця 30%).

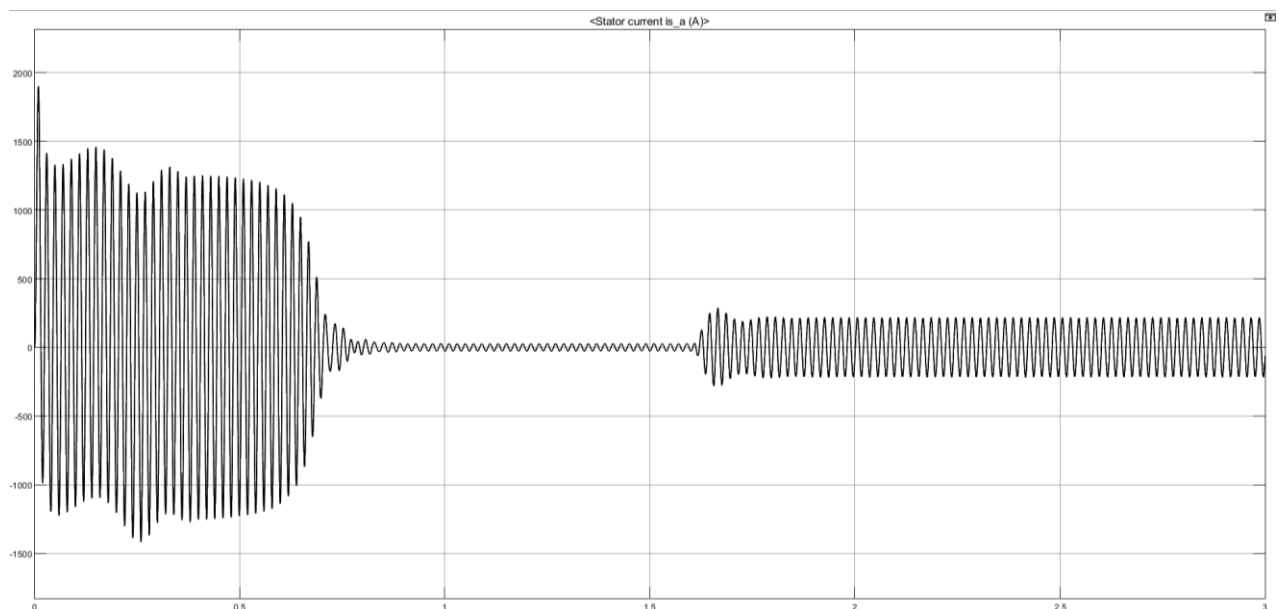


Рис. 3.2. Струм двигуну приводу коронки при прямому пуску

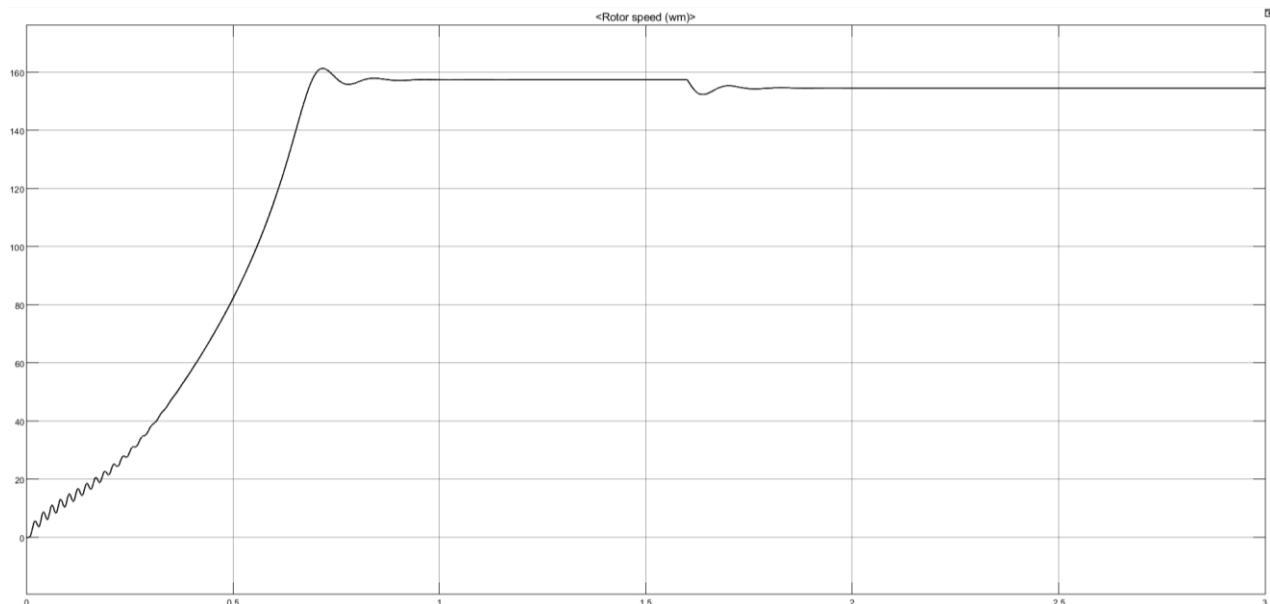


Рис. 3.3. Швидкість двигуну коронки при прямому пуску

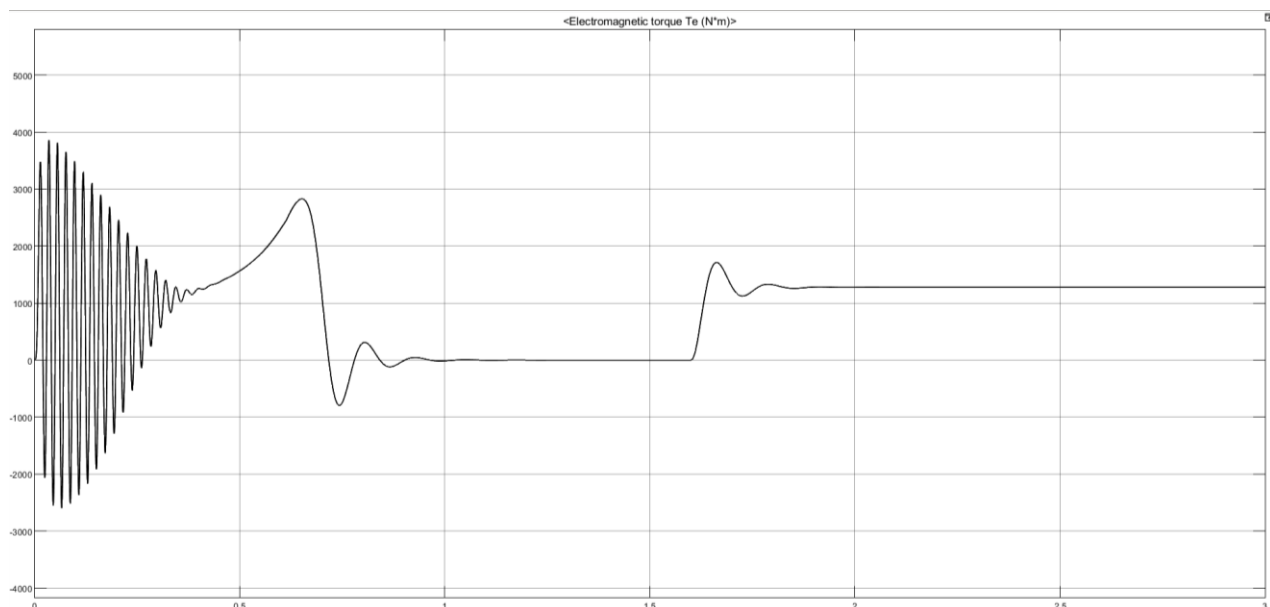


Рис. 3.4. Електромагнітний момент двигуну коронки при прямому пуску

Дослідимо далі прямий пуск частотного приводу. Для цього була створена модель, яка показана на рис. 3.5. На ней були отримані графіки перехідних процесів, які надані на рис. 3.6-3.8

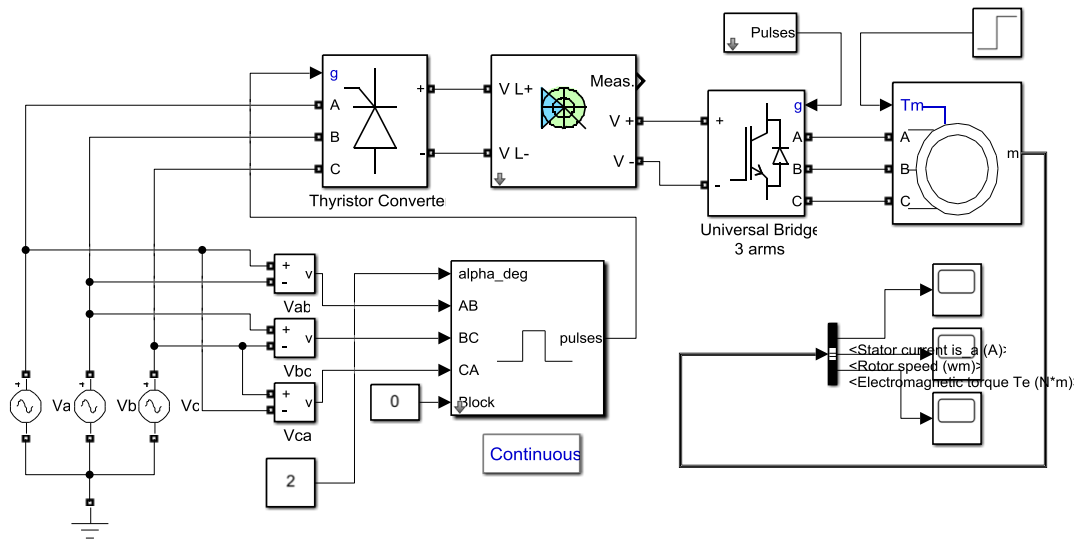


Рис. 3.5. Структура моделі Матлаб для дослідження прямого пуску АД від ПЧ

Можна побачити (рис. 3.7), що падіння швидкості під номінальним навантаженням помітно (до 5.1 c^{-1}) збільшується при застосуванні системи ПЧ-АД, ніж при роботі від мережі. Також зменшується величина пускового струму ПЧ-АД (з 1300 до 1000 А), що можна пояснити додаванням додаткових опорів в діодах, транзисторах та чоппері ПЧ. Максимальна величина електромагнітного моменту помітно знизилась – до 1800 Нм (см. рис. 3.8), через це пуск на 50 Гц від ПЧ йде більш довготривало, ніж безпосередньо при прямому пуску (0.75 сек проти 1.25 сек.).

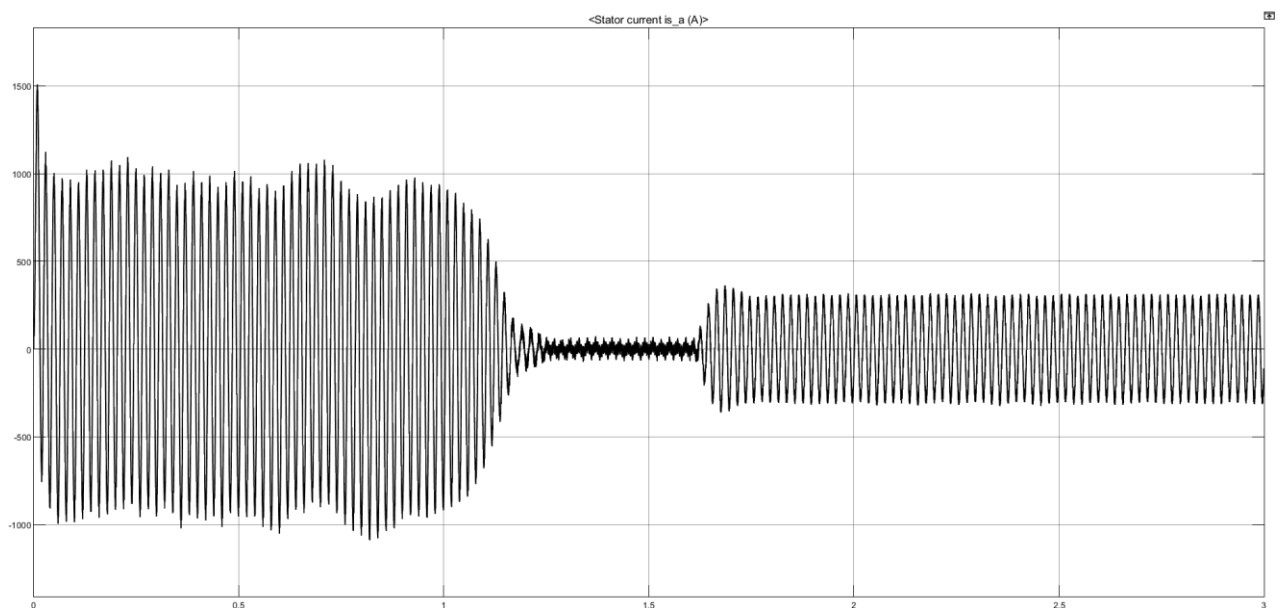


Рис. 3.6. Струм АД при прямому пуску от ПЧ

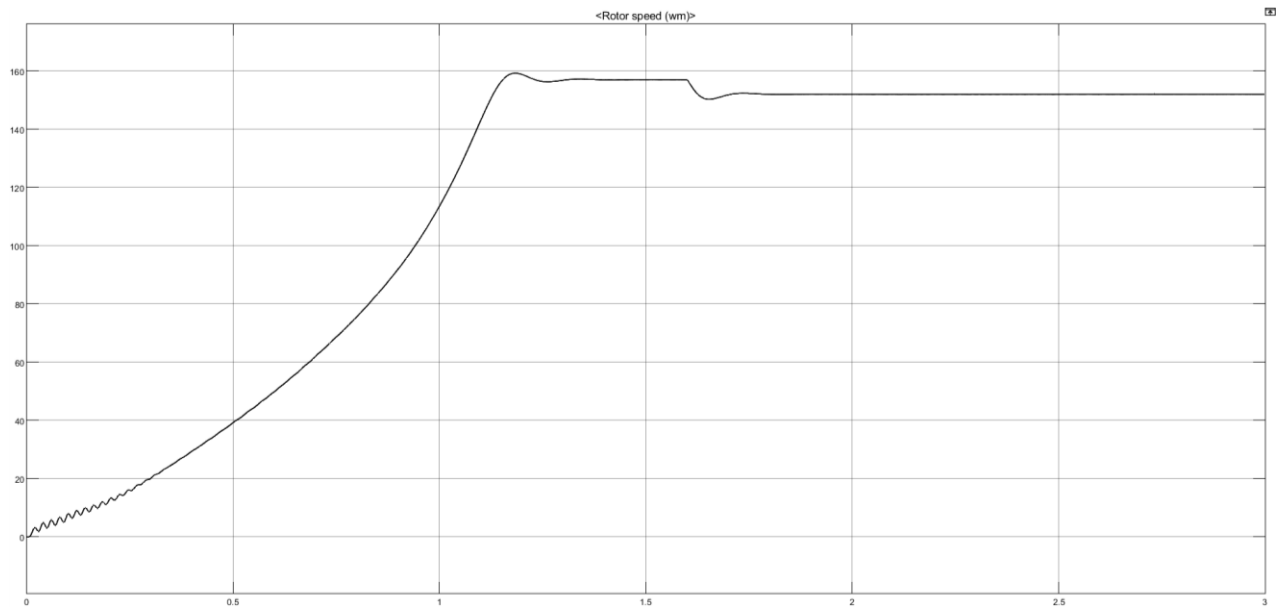


Рис. 3.7. Швидкість АД при прямому пуску от ПЧ

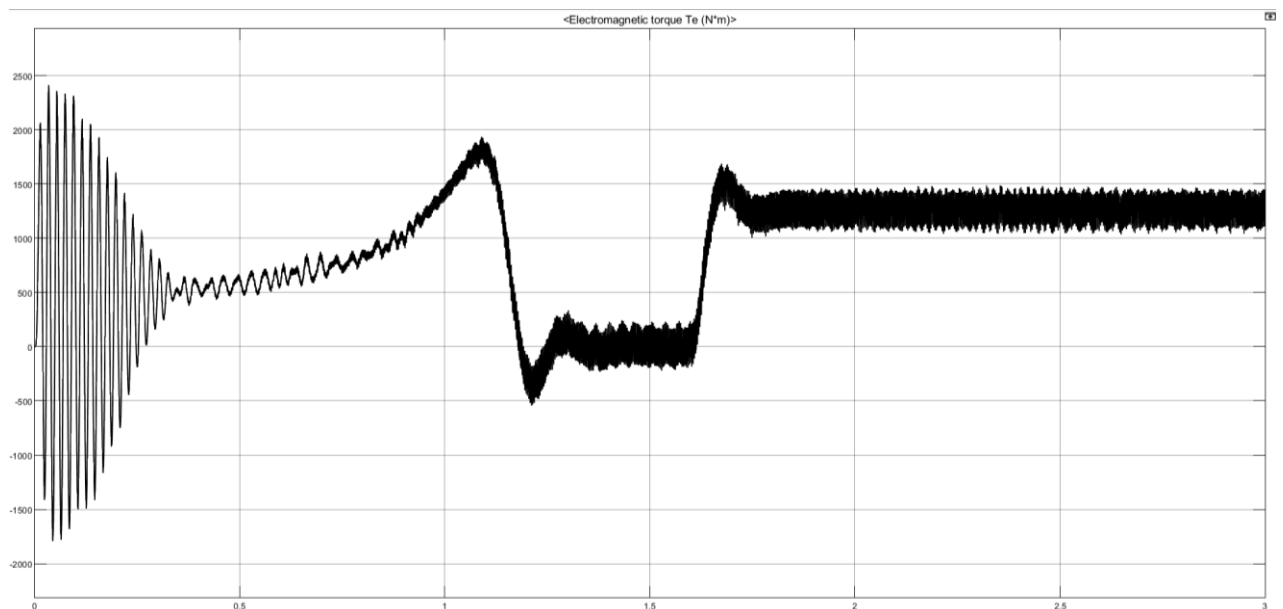


Рис. 3.8. Електромагнітний момент АД при прямому пуску от ПЧ

Дослідимо пуск з моментом номінальним на валу (тривалістю 1 сек) при застосуванні закону скалярного керування $\frac{U}{\sqrt{f}} = const$. Виконання вказаного закону наведене на рис. 3.9. В результаті були побудовані графіки рис. 3.10-3.12. Видно, що система приводу здатна здійснити пуск під повним навантаженням, тобто при зануренні коронки в породу. Звертає увагу, що

струм при цьому (рис. 3.11) все же менше, ніж при здійсненні прямого пуску від ПЧ (1300 А проти 1000 А). Звісно, при цьому (рис. 3.10), пуск здійснюється більш тривало – більше 1.6 секунд.

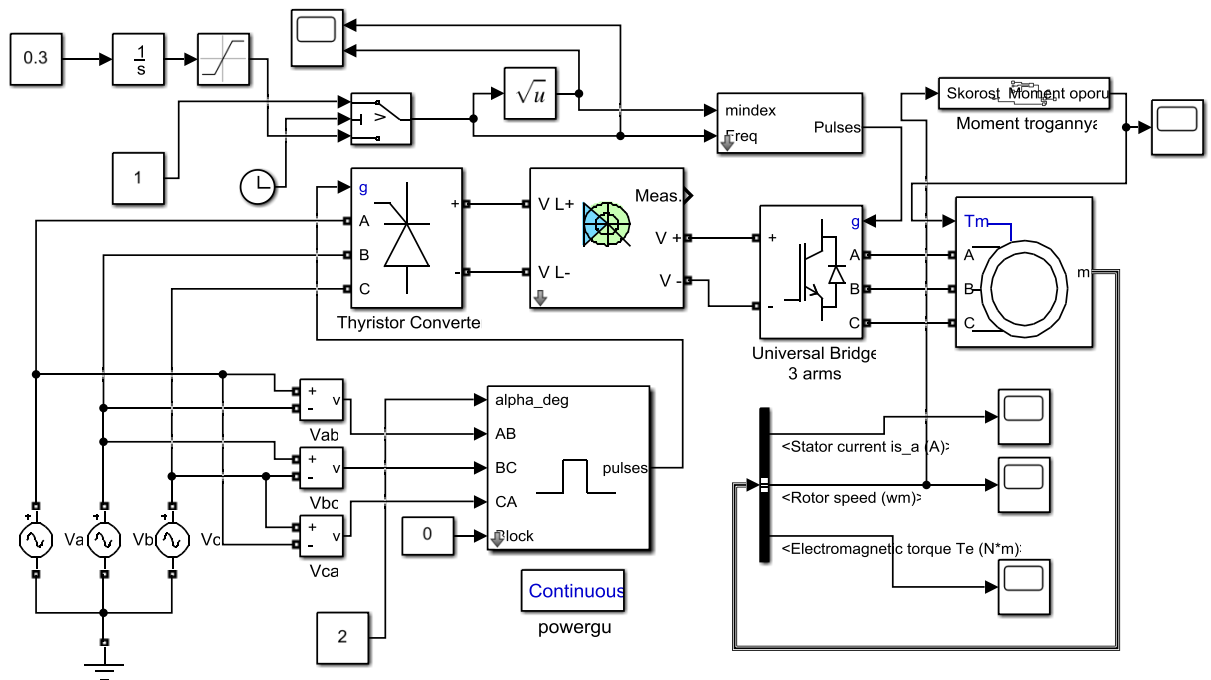


Рис. 3.9. Структура моделі з реалізацією закону керування $\frac{U}{\sqrt{f}} = const$

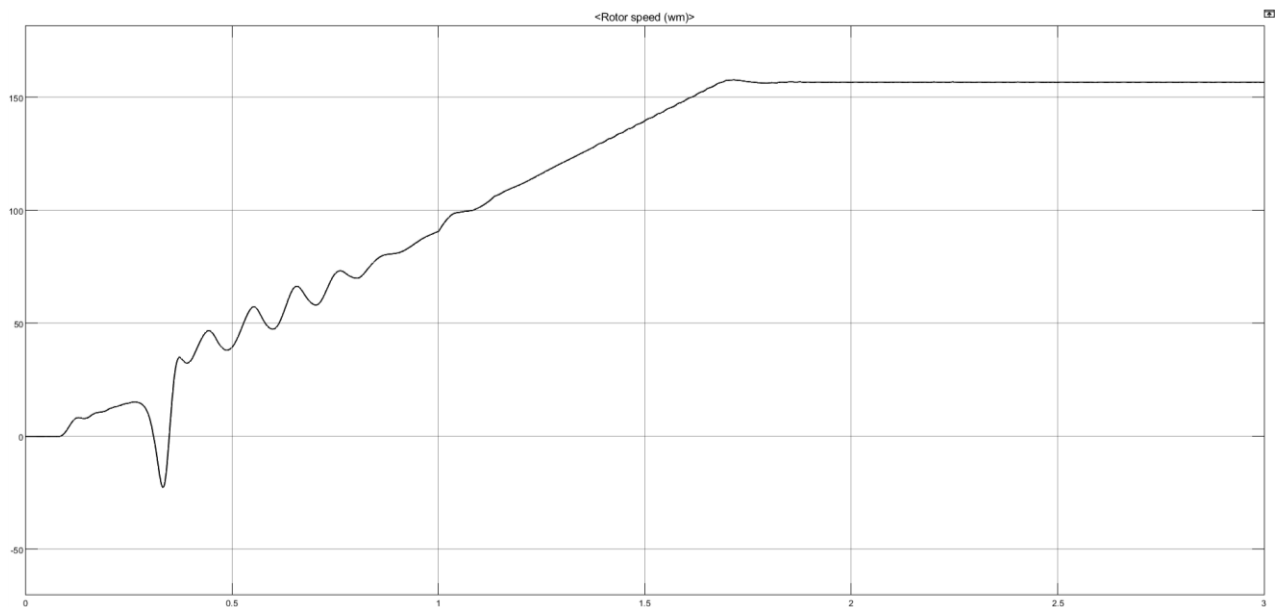


Рис.3.10. Швидкість АД при застосуванні закону $\frac{U}{\sqrt{f}} = const$

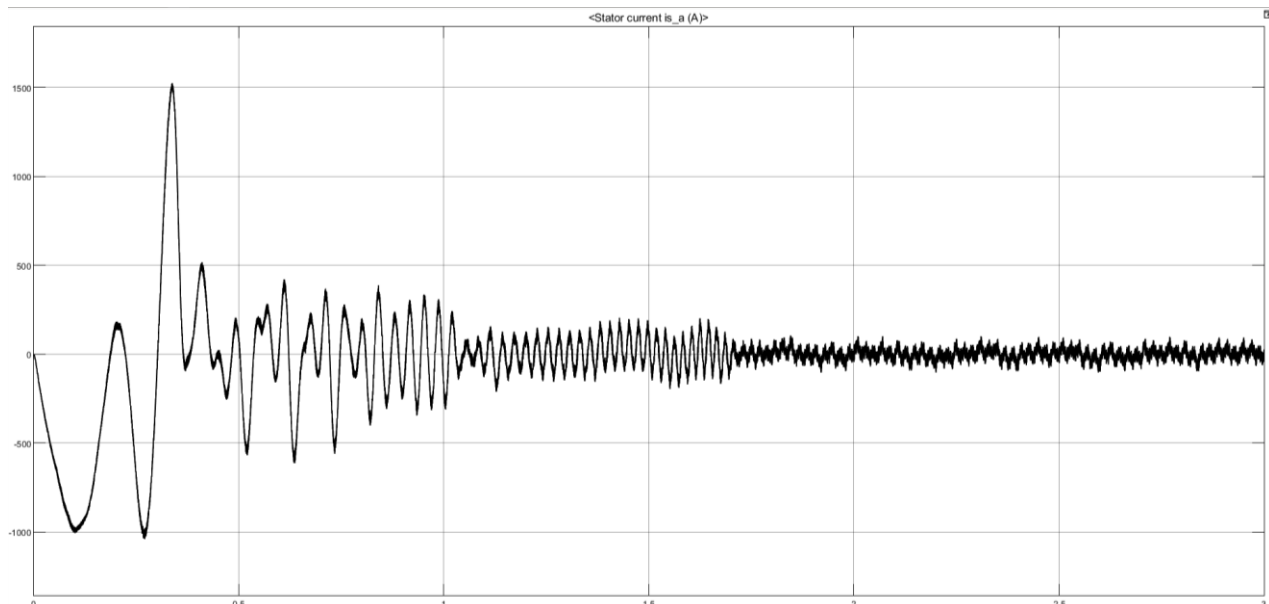


Рис. 3.11. Струм АД при застосуванні закону $\frac{U}{\sqrt{f}} = const$

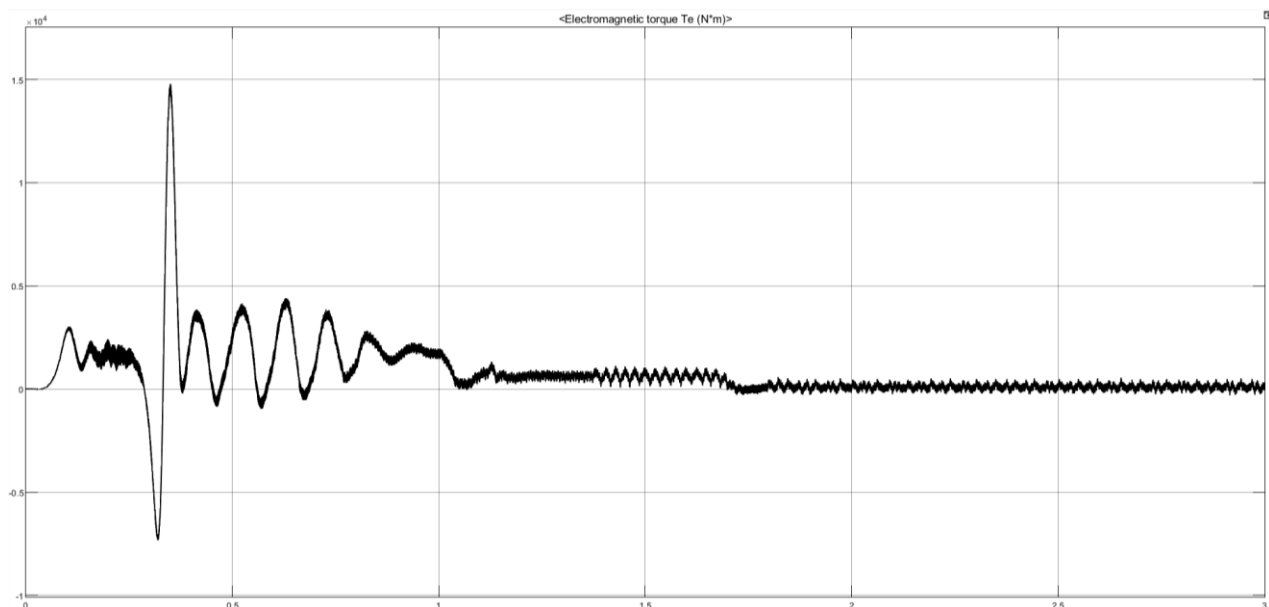


Рис. 3.12. Електромагнітний момент АД при застосуванні закону

$$\frac{U}{\sqrt{f}} = const$$

Для порівняння застосуємо прямий пуск приводу коронки. Результати дослідження вказаного випадку надані на рис. 3.13-3.15. Можна побачити (рис. 3.13), що привід вже нездатний зрушити коронку відносно породи. Можна також побачити (рис. 3.15), що величини електромагнітного моменту недостатньо для початку руху.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЕТФ. КНУ.РБ.141.25.249-04

Арк.

62

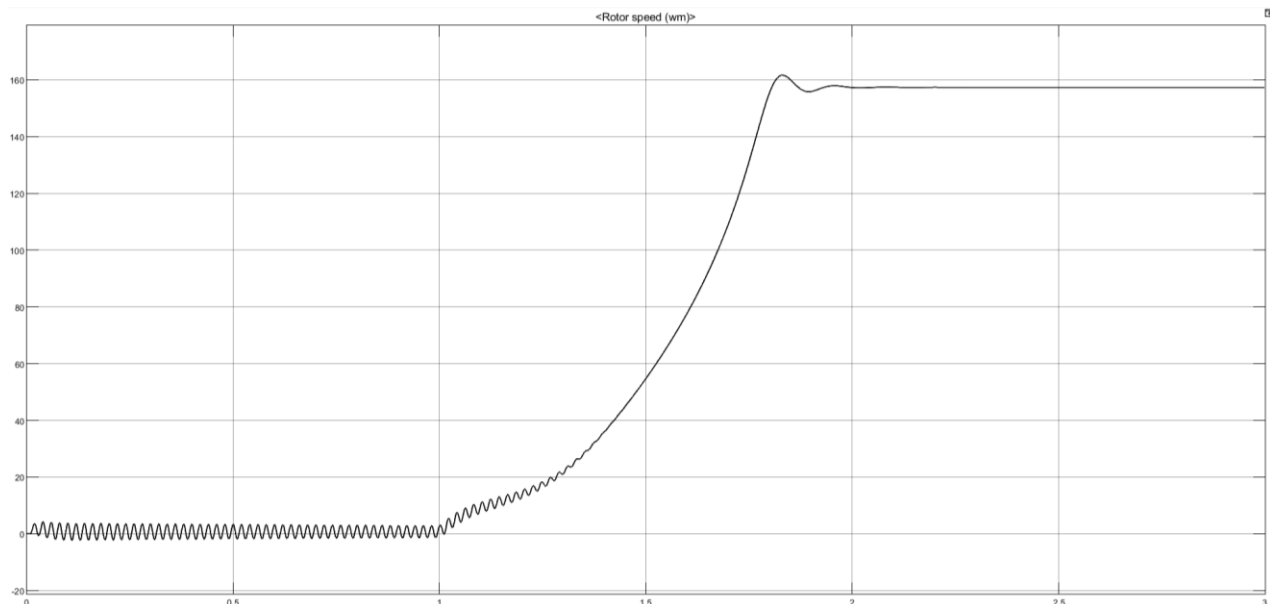


Рис. 3.13 Швидкість двигуна при прямому пуску АД

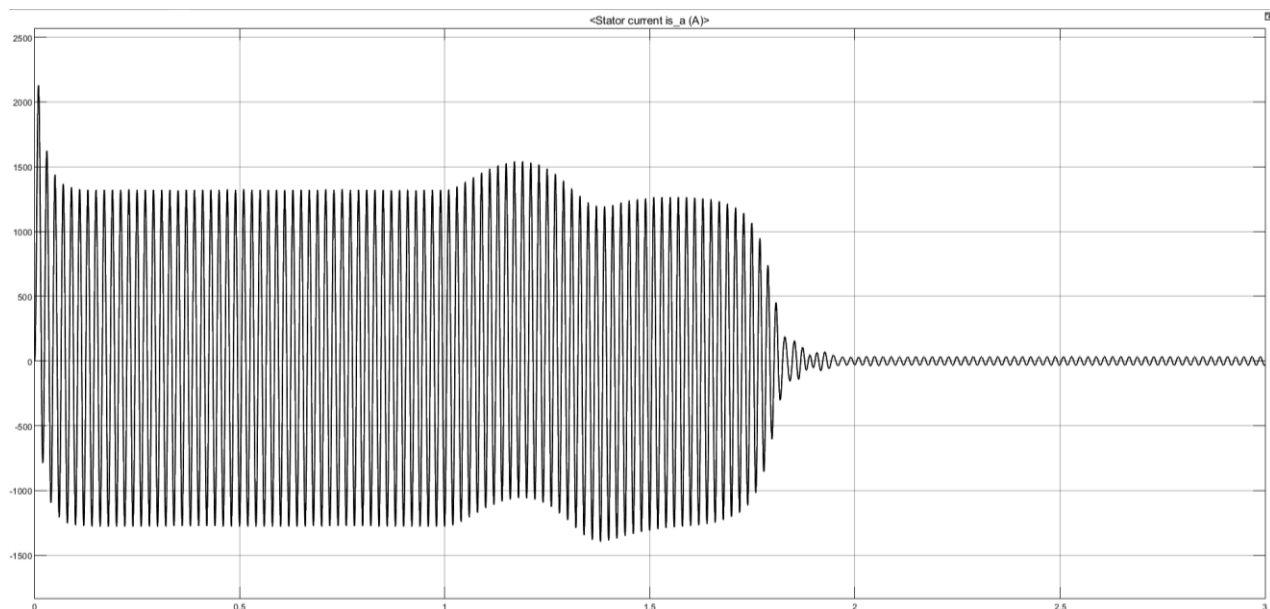


Рис. 3.14. Струм двигуна при прямому пуску АД

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЕТФ. КНУ.РБ.141.25.249-04

Арк.

63

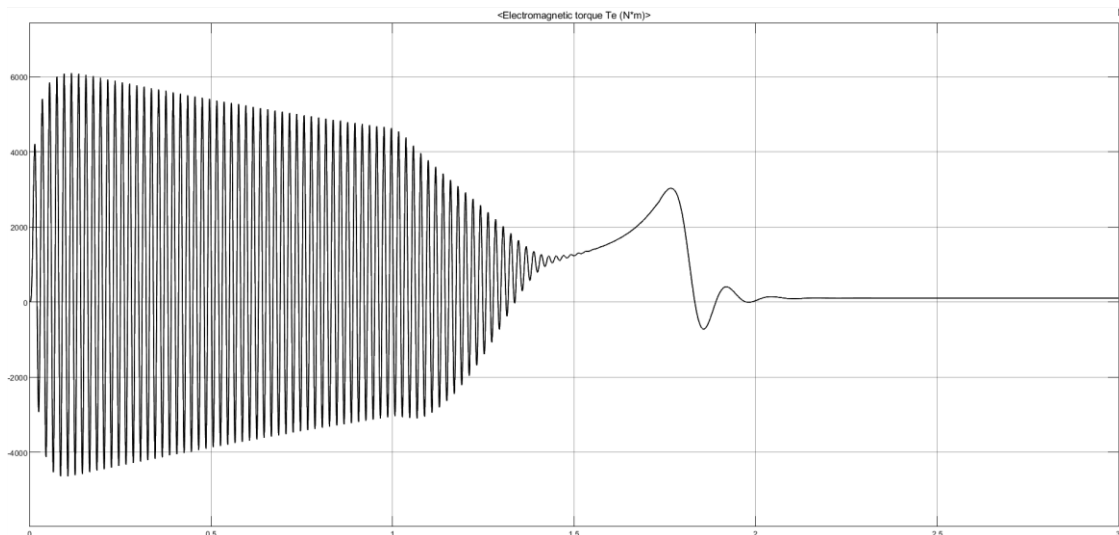


Рис. 3.15. Електромагнітний момент приводу коронки при прямому пуску АД

Далі здійснимо дослідження впливу закону скалярного керування при умові збільшення на коронці момента опору до занадто великих значень. Так, на рис. 3.16÷3.18 показаний пуск системи ПЧ-АД вхолосту, з 0 по 1.2 секунди (до 50 Гц), далі на 1.5 секунде здійснюється накид великого навантаження, яке дорівнює подвійному номінальному, швидкість починає знижуватись (привід не в змозі втримати таке навантаження), а на 2-й секунде частота ПЧ знижується до 25 Гц. Після чого привід вже здатний утримувати нове навантаження.

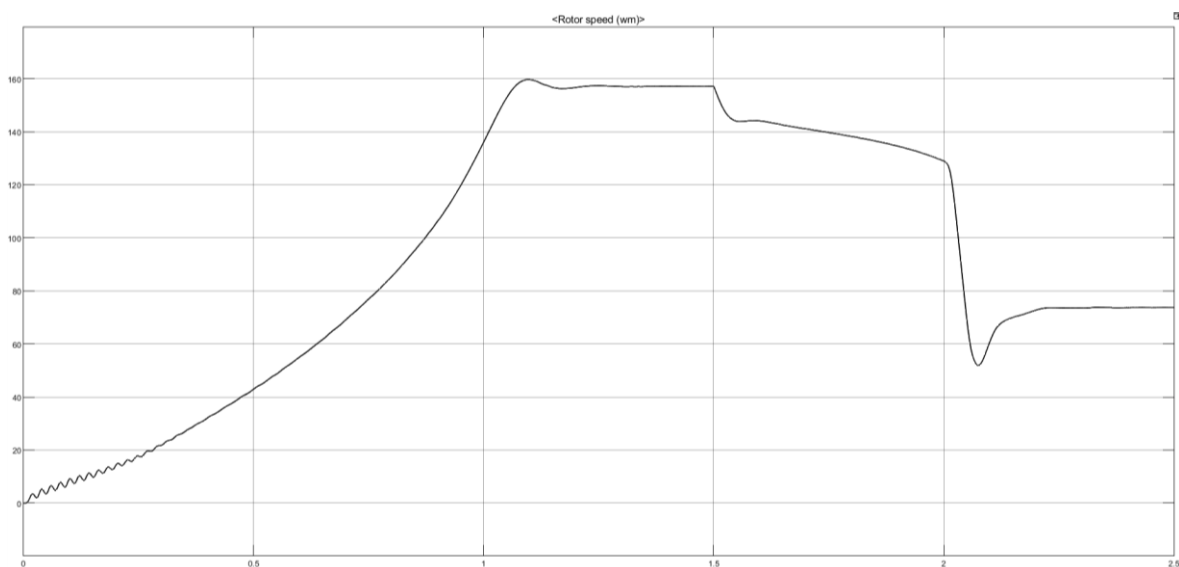


Рис. 3.16. Швидкість ПЧ-АД при накиду надмірного навантаження, й реакція системи скалярного керування

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЕТФ. КНУ.РБ.141.25.249-04

Арк.

64

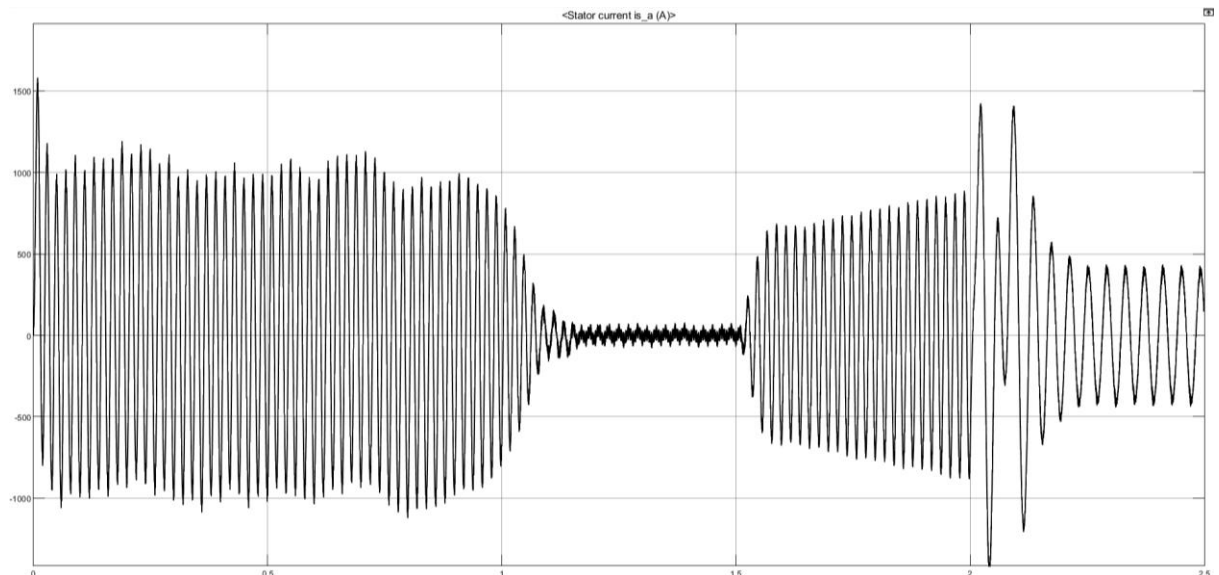


Рис. 3.17. Струм ПЧ-АД при накиду надмірного навантаження, й реакція системи скалярного керування

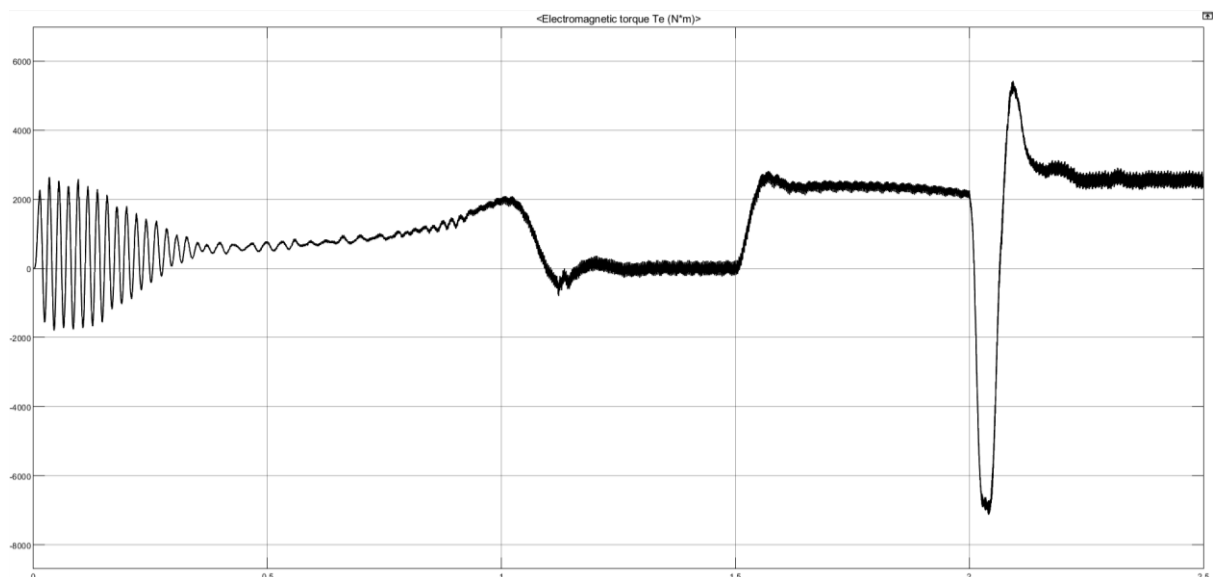


Рис. 3.18. Електромагнітний момент ПЧ-АД при накиду надмірного навантаження, й реакція системи скалярного керування

3.2. Аналіз якісних показників розробленої системи керування

Підведемо підсумки по результатам моделювання. По-перше, при високому моменті зрушення при використанні закону скалярного

керування $\frac{U}{\sqrt{f}} = const$ для системи ПЧ-АД дозволяє здійснювати

надійний пуск системи. Але, треба мати на увазі наступні обставини. По-перше, висока величина моменту зрушення практично не зустрічається в практиці використання видобувних комбайнів. По-друге, такий спосіб пуску все одно неприйнятний через значні коливання електромагнітного моменту спочатку пуску (при цьому навіть швидкість коронки може зайти в область негативних значень). Звідси виходить один важливий висновок – система скалярного керування мало придатна для оптимального керування перехідними процесами. Але за допомогою моделювання було встановлене, що система скалярного керування добре підходить для регулювання статичних характеристик приводу. Так, раптова зустріч коронки з більш твердою породою не приведе к зупинці приводу. Щоб продовжити роботу, треба просто знизити частоту перетворювача частоти, а вже закон керування $\frac{U}{\sqrt{f}} = const$ відпрацює збільшення

обертового моменту двигуну до прийнятних значень. Як відомо, комбайн зазвичай працює довготривало, приводу коронки не потрібна висока швидкодія. Взагалі, перемикання частоти з 50 до 25 Гц на рис.3.16÷3.18 здійснювалося занадто різко, частоту можна було би знижувати плавно, й при цьому можна було би уникнути різких поштовхів електромагнітного моменту та струму приводу. Враховуючі вищесказане, можна вважати, що по регульовальним показникам система електроприводу ПЧ-АД зі скалярним законом регулювання $\frac{U}{\sqrt{f}} = const$ цілком задовольняє виробничим вимогам.

					ЕТФ. КНУ.РБ.141.25.249-04	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

Кваліфікаційна робота присвячена модернізації електроприводу коронки видобувного комбайна АМ-75. Метою кваліфікаційної роботи є розробка та проектування автоматизованого електромеханічного комплексу приводу коронки комбайна.

У першому розділі проаналізовано технічний опис та загальну характеристику комбайнів, та умови їх роботи; наведено фотографії, схематично загальний вигляд комбайну з коментарями, структуру кінематичної схеми та перелік основного робочого обладнання на шасі комбайну; наведено перелік вимог до умов правильної роботи коронки. Були з'ясовані вимоги, що пред'являються до приводу коронок комбайнів, та зроблений обґрунтований вибір системи електроприводу як ПЧ-АД для приводу коронки. Враховуючи параметри режиму видобування руди, був зроблений попередній розрахунок і вибір двигуну коронки. До вказаного двигуну далі був здійснений вибір устаткування, необхідного для комплектування СЕП ПЧ-АД.

Використовуючи паспортні дані обраного електродвигуна, був зроблений розрахунок параметрів, що входять у схему заміщення двигуна. Ці результати були використані для побудування швидкісних, механічних та енергетичних характеристик при частотному керуванні АД.

У другому розділі проведено аналіз вимог до систем автоматизації та обґрунтовано застосування скалярної системи керування; наведено структурну схему автоматизованої системи керування. Також наведено та описано варіант мікропроцесорної реалізації перетворювача частоти.

У третьому розділі здійснено моделювання системи частотного керування АД. Початкові дослідження прямого пуску одиночного АД від мережі показали високу достовірність розрахункових параметрів схеми заміщення АД. Дослідження динаміки скалярного керування ПЧ-

					ЕТФ. КНУ.РБ.141.25.249-04	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

АД показали, що характер та показники перехідних процесів відповідають встановленим вимогам до приводів головного механізму комбайну.

					ЕТФ. КНУ.РБ.141.25.249-04	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1) Instruction manual AM 75/162. Austria, Zeltweg: Voest-Alpine Bergtechnik Ges.m.b.H.,2005.
- 2) Combine Harvesters Theory, Modeling, and Design By Petre Miu 494 Pages Published February 19, 2018 by CRC Press
- 3) Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies W. A. Hustrulid, Richard L. Bullock SME, 2001 - 718 pages
- 4) New Mining Tools and Methods for Roadheader Mining Heads 1st ed. 2022 Edition by Krzysztof Kotwica (Author) Language : English Print length: 144 pages
- 5) Roadheader – A comprehensive review Suraj Deshmukha , A.K. Rainaa, V.M.S.R. Murthyb , R. Trivedia , R. Vajrea Tunnelling and Underground Space Technology 95 (2020) 103148
- 6) Erika Škvareková, Marianna Tomašková, Dušan Sabadka, Marian Šofranko Technical University of Kosice Štefan Zelenák Hornonitrianske Bane Prievidza, a.s Evaluation and risk factors of roadheaders in coal mines Management Systems in Production Engineering 2021, Volume 29, Issue 3, pp. 242-250
- 7) Adaptive Cutting Control for Roadheaders Based on Performance Optimization by Qingyun Liu, Chao Lu, Tao Liu and Zhangbao Xu School of Mechanical Engineering, Anhui University of Technology, Anhui 243000, China Machines 2021, 9(3), 46
- 8)

ДОДАТОК А

Специфікація елементів принципової схеми перетворювача частоти

Основна схема плати керування ПЧ (рис. 2.5)

Позначення	Кількість	Опис
C2	1	4700 p
C1.C3, C4, C5, C6, C10, C11.C12, C13, C14, C15	11	0.1- μ F конденсатор
C7, C8, C9	3	0. 022 μ F
C16	1	10- μ F конденсатор @ 50 Vdc
C17	1	2. 2- μ F конденсатор @ 50 Vdc
D1	1	Червоний світлодіод
D2	1	Жовтий світлодіод
D6	1	Зелений світлодіод
D3, D4, D5, D7, D8, D9, D10, D14	8	1N4148 діод малого сигналу
D11, D12, D13, D15, D16	5	Діод
F1	1	3-контактний фільтр
Л	1	40-контактний роз'єм
J2	1	DB-9
J3	1	Роз'єм живлення
JP2, JP3, JP4, JP5	4	1x4 контактний роз'єм
JP1, JP7, JP9, JP10	4	1x2 контактний роз'єм
JP6, JP8	0	1x2 контактний роз'єм - не встановлений

Схема зворотних зв'язків ПЧ (рис. 2.6)

Позначення	Кількість	Опис
R18, R19, R36, R37	4	1 кОм резистор
R11, R14, R29, R39	4	4.7 кОм резистор
R22, R26	2	6.8 кОм резистор
R34	1	470 Ом резистор
R12, R13, R15, R16, R20, R21	0	Резистори не встановлені
R1, R2, R4, R6, R7	5	50 кОм підстроюючий потенціометр
R5	1	10 кОм підстроюючий потенціометр
R3, R8	2	5 кОм підстроюючий потенціометр
R17	1	5 кОм резистор
R9, R25	2	22 кОм резистор
R38	1	330 Ом резистор
R23, R27, R28, R31, R32, R33, R35	8	10 кОм резистор
R30	1	10 мОм резистор
R10	1	15 кОм резистор
R24	1	3.3 кОм резистор
SW1, SW2	2	SPDT тумблер
SW3	1	Моментний кнопковий перемикач
TP6, TP9	2	Контрольна точка чорна
TP1, TP2, TP3, TP4, TP5, TP7, TP8	7	Контрольна точка червона
TP10, TP11, TP12, TP13, TP14, TP15, TP16	7	Контрольна точка біла

Схема протоколу RS232 та живлення ПЧ (рис. 2.7)

Позначення	Кількість	Опис
U2	1	МСЗРНАС
U3, U4	2	4N35 оптрон
U5	1	Фіксований регулятор на 5 В
U1	1	Чотирьохфункціональний підсилювач
X1	1	4. 00-MHz резонатор
XU2	1	28-контактний роз'єм для U2
Немає показчика	1	0. 25-дюймовий гвинт 4-40 для U5
Немає показчика	1	4-40 гайка для U5
Немає показчика	5	Накладки на гумові ніжки
Неізолювана друкована плата	1	ASB509 неізолювана друкована плата
Немає показчика	7	Шунти для JP1-JP5, PJ9, JP10